



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica

Escuela Profesional de Ingeniería de Telecomunicaciones

Simulación y evaluación de los modelos de pérdidas de propagación de gran escala en entornos urbano-densos para la red de comunicaciones móviles de quinta generación (5G) para las bandas de 28 y 73GHz

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniera de
Telecomunicaciones

AUTOR

Jenny Mirella LUQUE QUISPE

ASESOR

Mg. Daniel DÍAZ ATAUCURI

Lima, Perú

2020



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Luque, J. (2020). *Simulación y evaluación de los modelos de pérdidas de propagación de gran escala en entornos urbano-densos para la red de comunicaciones móviles de quinta generación (5G) para las bandas de 28 y 73GHz*. Tesis para optar el título de Ingeniera de Telecomunicaciones. Escuela Profesional de Ingeniería de Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

Hoja de metadatos complementarios

Código ORCID del autor	“—”
DNI o pasaporte del autor	47040241
Código ORCID del asesor	Orcid.org/0000-0001-5747-2795
DNI o pasaporte del asesor	07139361
Grupo de investigación	Grupo de Aplicaciones de las Tecnologías de Información y Comunicación de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica de la UNMSM
Agencia financiadora	<ul style="list-style-type: none"> a. País: Perú b. Agencia financiadora: Vicerrectorado de Investigación y Postgrado UNMSM – VRIP c. Nombre del programa financiero: Programa de Promoción de Tesis de Pregrado. d. Número de contrato : Comunicado N°03-2017 VRIP.
Ubicación geográfica donde se desar	Lugar: Centro Comercial de Gamarra, Lima. Coordenadas geográficas: 12°06'S, -77°010 12°05'S, -77°0850
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2017-2019
Disciplinas OCDE	Telecomunicaciones https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.05



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN N° 001-EPIT-FIEE/2020

**TESIS N° 001-FIEE/2020 PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIONES**

Los suscritos Miembros de Jurado, nombrados por la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería de Telecomunicaciones, reunidos en la fecha bajo la Presidencia del Dr. Santiago Rojas Tuya e integrado por los Ingenieros: Mag. Jesús Otto Villanueva Napurí, Mag. Wilbert Chávez Irazábal y el Mag. Daniel Díaz Ataucuri (Miembro -Asesor)

Después de escuchar la Sustentación de Tesis de la Bachiller Jenny Mirella Luque Quispe (11190067), para optar el Título Profesional de Ingeniera de Telecomunicaciones por la modalidad de Titulación Ordinaria, quien expuso su TESIS: “Simulación y evaluación de los modelos de pérdidas de propagación de gran escala en entornos urbano-denso para la red de comunicaciones móviles de quinta generación (5G) para las bandas de 28 y 73 GHz”.

Se acordó APROBAR por UNANIMIDAD, COMO MUY BUENO.

Con la Nota de DIECISIETE (17)

Ciudad Universitaria, 18 de julio de 2020.

Dr. Santiago Rojas Tuya
Presidente de Jurado

Mag. Jesús Otto Villanueva Napurí
Miembro de Jurado

Mag. Wilbert Chávez Irazábal
Miembro de Jurado

Mag. Daniel Díaz Ataucuri
Miembro de Jurado-Asesor

Mag. Jesús Otto Villanueva Napurí
Director de la EPIT



Dr. Víctor Manuel Cruz Ormatta
Decano FIEE – UNMSM

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos para obtener el título de Ingeniero de Telecomunicaciones.

Área: Comunicaciones móviles

Asesor: Magister Daniel Díaz Ataucuri

Co-asesor: Doctor Saúl Adrián Inca Sánchez

DEDICATORIA

A Dios que me ha brindado una vida llena de alegrías y aprendizajes.

A mis padres Jaime L. y Marcelina Q.

A la memoria de mi abuelita Agustina.

A mis maestros: Daniel D, Saúl I.

A mis amigos: Miriam S., Joseph Ch., Jessica Ch., Juan S., Yesenia P.

A mi compañero de vida Marco P. por su constante motivación y estar
presente en la evolución de este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Al Mg. Saúl Inca, miembro del iTEAM (Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia de la UPV), quien depositó su entera confianza en este reto y me mostró su disposición y amistad. Gracias por sus siempre atentas y rápidas respuestas a las diferentes inquietudes surgidas durante el desarrollo de este trabajo.

Al Mg. Daniel Diaz por acompañarme y guiar mis ideas a lo largo de mi formación universitaria, ha sido un aporte invaluable.

Al Instituto Nacional de Investigación y Capacitación de Telecomunicaciones “INICTEL-UNI” por ser ventana de trabajo que permitió terminar esta investigación.

Al Vicerrectorado de investigación y Post grado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por la subvención otorgada por concurso de tesis.

INDICE

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABLAS	XII
RESUMEN	XIV
ABSTRACT	XV
 CAPÍTULO 1	 16
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	16
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.2.1 PROBLEMA GENERAL	17
1.2.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS	17
1.3 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS	17
1.3.1 HIPÓTESIS GENERAL	17
1.3.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	17
1.4 JUSTIFICACIÓN	18
1.5 ANTECEDENTES	19
1.6 OBJETIVOS	22
1.6.1 OBJETIVO GENERAL	22
1.6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
1.7 METODOLOGÍA	22
1.7.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	22
1.7.2 DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO	23
1.8 LIMITACIONES DEL ESTUDIO	23
CAPÍTULO 2	25
MARCO TEÓRICO	25
2.1 QUINTA GENERACIÓN (5G)	25
2.1.1 GRUPOS DE TRABAJO Y ROADMAPS	26
2.1.1.1 CUERPO NORMATIVO:	26
2.1.1.2 EMPRESAS DE TECNOLOGÍA MÁS RELEVANTES DEL SECTOR: ...	29
2.1.1.3 OTROS GRUPOS:	29

2.1.2	ONDAS DE RADIO.....	29
2.1.3	ONDAS MILIMÉTRICAS (mmW).....	29
2.1.4	CANAL DE RADIO.....	30
2.1.5	ESPECTRO RADIOELÉCTRICO.....	33
2.1.6	ESTADO ACTUAL DE LA 5G EN EL MUNDO	34
2.1.7	ESTADO ACTUAL DE LA 5G EN EL PERÚ.....	36
2.1.8	RETOS Y TENDENCIAS	37
2.1.9	TEOREMA DE SHANNON.....	41
2.1.10	INTERFERENCIA CO-CANAL	42
2.1.11	RELACIÓN DE LA SEÑAL-RUIDO.....	42
2.1.12	TECNOLOGÍA RADIOCOGNITIVA Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	43
2.1.13	FADING O DESVANECIMIENTO	44
2.2	PÉRDIDA DE TRAYECTORIA A GRAN ESCALA.....	45
2.2.1	PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN EN ESPACIO LIBRE.....	46
2.2.2	DISIPACIÓN DE POTENCIA DE TRANSMISOR	46
2.2.3	PÉRDIDAS POR SOMBRA O SHADOWING	47
2.2.4	EFFECTOS ATMOSFÉRICOS	47
2.2.5	MECANISMOS BÁSICOS DE PROPAGACIÓN.....	48
2.2.5.1	REFLEXIÓN.....	49
2.2.5.2	REFRACCIÓN.....	49
2.2.5.3	DIFRACCIÓN.....	50
2.2.5.4	DISPERSIÓN.....	50
2.3	PÉRDIDA DE TRAYECTORIA A PEQUEÑA ESCALA.....	50
2.3.1	PROPAGACIÓN POR MULTITRAYECTORIA	50
2.3.2	DESPLAZAMIENTO POR EFECTO DOPPLER	51
2.3.3	INTERFERENCIA ENTRE SÍMBOLOS	51
2.4	MODELOS DE CANAL	53
2.5	ESCENARIOS Y REQUISITOS PARA EL MODELADO	56
2.7	PROPUESTAS DE MODELOS DE PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN PARA 5G	60
2.7.1	MODELO DE PROPAGACIÓN ITU	61
2.7.2	MODELO DE PROPAGACIÓN 3GPP-3D	63
2.7.3	MODELO DE PROPAGACIÓN METIS.....	65

2.8	UNITY	71
CAPITULO 3		74
IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN EN LA PLATAFORMA UNITY 3D.....		74
3.1	VARIABLES DE ESTUDIO	76
3.2	DISEÑO DEL ESCENARIO	77
3.2.1	PROCEDIMIENTO.....	78
3.2.2	INTERFAZ DE UNITY	81
3.2.3	RESUMEN DE ELEMENTOS UTILIZADOS DE UNITY	83
CAPITULO 4		86
MEDICIONES Y RESULTADOS		86
4.1	GENERAL	86
4.1.1	ENLACE CON LINEA DE VISTA.....	87
4.1.2	ENLACE SIN LINEA DE VISTA.....	90
4.2	INTERPRETACIÓN DE LAS MEDICIONES	93
CAPITULO 5		102
CONCLUSIONES		102
RECOMENDACIONES.....		104
BIBLIOGRAFÍA		105
ANEXOS		109
ANEXO 1: SCRIPT DE LA DECLARACIÓN DE DATOS DE LA RED.....		109
ANEXO 2: SCRIPT DE LA INTERFAZ GRÁFICA		110
ANEXO 3: SCRIPT DEL GENERADOR DE RAYOS		112
ANEXO 4: SCRIPT DEL MECANISMO CONTROLADOR DEL MÓVIL		116
ANEXO 5: SCRIPT DEL CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN PARA EL MODELO IMT		117
ANEXO 6: SCRIPT DEL CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN PARA EL MODELO 3GPP.....		120
ANEXO 7: SCRIPT DEL CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN PARA EL MODELO METIS.....		123

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Flujo de metodología de la investigación. Fuente: Elaboración propia	... 23
Figura 2.1:	Visión de los desempeños resumidos por Nokia. Fuente: Web IEEE Future directions (2018)	... 26
Figura 2.2:	Línea de tiempo más reciente expuesta por Dr. Ying Peng (DATANG). Fuente: Workshop on IMT-2020 terrestrial radio interfaces (2017)	... 27
Figura 2.3:	Línea de tiempo más reciente expuesta por Giovanni Romano, Grupo UIT-R. Fuente: Workshop on IMT-2020 terrestrial radio interfaces (2017)	... 28
Figura 2.4:	Clasificación de las ondas de radio. Fuente: Elaboración propia basado en la teoría de ondas	... 29
Figura 2.5:	Espectro de ondas milimétricas. Fuente: Millimeter Wave Technology in Wireless PAN, LAN and MAN (2008)	... 30
Figura 2.6:	Características del canal de radio. Fuente: Elaboración propia basado en teoría de canal de radio.	... 32
Figura 2.7:	Espectro radioeléctrico. Fuente: Sitio Web Esopo (2018). Disponible en: https://iie.fing.edu.uy/proyectos/esopo/eem/	... 33
Figura 2.8:	Nomenclatura y características de las bandas de frecuencia. Fuente: UIT-R V.431-7 (2000)	... 34
Figura 2.9:	Nuevo espectro radioeléctrico para 5G. Fuente: Recomendaciones 5G Américas (2015). Disponible en http://searchdatacenter.techtarget.com/es/cronica/El-nuevo-espectro-para-5G-Se-estudian-11-nuevas-bandas	... 35
Figura 2.10:	Arquitectura de Red móvil para 5G. Fuente: Key techniques for 5G wireless communications: network architecture, physical layer, and MAC layer perspectives (2015)	... 38
Figura 2.11:	Modelo de la convergencia en el núcleo del paquete. Fuente: Netmanias Tech-Blog: Mobile Network Architecture for 5G Era - New C-RAN Architecture and Distributed 5G Core (2015)	... 39

Figura 2.12:	Diagrama general de un sistema de comunicaciones. Fuente: Adaptado de Shannon (1949)	... 41
Figura 2.13:	Path Loss, Shadowing y Multipath Vs Distancia Fuente: Andrea Goldsmith (2004)	... 46
Figura 2.14:	Efecto de los obstáculos. Fuente: Elaboración propia	... 47
Figura 2.15:	Atenuación debida a los gases atmosféricos Vs Frecuencia de la portadora. Fuente: Recomendaciones de la ITU Rec. UIT-R M.2376 (2015)	... 48
Figura 2.16:	Reflexión de la onda. Fuente: F. García (2003)	... 49
Figura 2.17:	Recepción de símbolos en un sistema ideal. Fuente: Leopdrini (2014)	... 52
Figura 2.18:	Interferencia Inter simbólica. Fuente: Leopdrini (2014)	... 52
Figura 2.19:	Clasificación de las celdas. Fuente: G. Espinoza (2016)	... 55
Figura 2.20:	Esquema de un modelo de canal convencional. Fuente: Elaboración propia basado en Keysight Technologies (2018)	... 55
Figura 2.21:	Esquema de un modelo de canal MIMO. Fuente: Elaboración propia basado en Keysight Technologies (2018)	... 55
Figura 2.22:	Situaciones típicas de propagación en zonas urbanas. Fuente: UIT-R P.1411	... 60
Figura 2.23:	Escenario de campaña de medición de la ITU. Fuente: C. Larsson, F. Harrysson, B. Olsson, J. Berg (2014)	... 61
Figura 2.24:	Timeline de METIS. Fuente: A. Osseiran, et. al (2014) Disponible en: https://www.semanticscholar.org/paper/Scenarios-for-5G-mobile-and-wireless-the-vision-of-Osseiran-Boccardi/98e0b8bbcad04687dbc85c307c94cf6c044ffb6c	... 65
Figura 2.25:	Características del escenarios de propagación definidos en METIS. Fuente: Journey Towards 5G, Ericsson (2014)	... 66
Figura 2.26:	Geometría 3D de la construcción de la ciudad de Madrid. Fuente: Deriverable D6.1 de METIS (2013)	... 67

Figura 2.27:	Diagrama de bloques del modelo basado en mapas. Fuente: Elaboración propia basado del libro 5G Mobile and Wireless Communications Technology de A. Osseiran, J. Monserrat y P. Marsh (2017)	... 68
Figura 2.28:	Escenario de propagación definido en METIS. Fuente: Deliverable D6.1 de METIS (2003)	... 68
Figura 2.29:	Casos de uso de Unity. Fuente: Unity Technologies (2018) y METIS (2016)	... 71
Figura 2.30:	Capas de información utilizadas para la visualización en el proyecto METIS-II. Fuente: METIS II (2016)	... 73
Figura 3.1:	Centro Comercial Gamarra. Fuente: Elaboración propia en base a visita al lugar	... 76
Figura 3.2:	Variables del escenario. Fuente: Elaboración propia en base a visita al lugar	... 77
Figura 3.3:	Centro Comercial Gamarra. Fuente: Google Earth	... 78
Figura 3.4:	Diseño por manzanas del Centro Comercial Gamarra. Fuente: Elaboración propia	... 78
Figura 3.5:	Simulación del Centro Comercial de Gamarra. Fuente: Elaboración propia	... 80
Figura 3.6:	Interfaz Unity de centro comercial Gamarra – La Victoria Fuente: Elaboración propia	... 82
Figura 4.1:	Relación de probabilidad de tener línea de vista Vs el valor aleatorio “a”. Fuente: Elaboración propia	... 87
Figura 4.2:	Comparación de pérdidas de propagación a 28GHz con línea de vista del Centro comercial Gamarra. Fuente: Elaboración propia.	... 88
Figura 4.3:	Comparación de pérdidas de propagación a 73GHz con línea de vista del Centro comercial. Elaboración propia	... 89
Figura 4.4:	Relación de probabilidad de tener línea de vista Vs el valor aleatorio “a”. Fuente: Elaboración propia	... 90

Figura 4.5:	Comparación de pérdidas de propagación a 28GHz sin línea de vista del Centro comercial Gamarra. Fuente: Elaboración propia	... 91
Figura 4.6:	Comparación de pérdidas de propagación a 73GHz sin línea de vista del Centro comercial Gamarra. Fuente: Elaboración propia	... 92
Figura 4.7:	Caso 1 de medición. Fuente: Elaboración propia	... 95
Figura 4.8:	Caso 2.1 de medición. Fuente: Elaboración propia	... 96
Figura 4.9:	Caso 2.2 de medición. Fuente: Elaboración propia	... 97
Figura 4.10:	Caso 3 de medición. Fuente: Elaboración propia	... 98
Figura 4.11:	Caso 4 de medición. Fuente: Elaboración propia	... 99

LISTA DE TABLAS

Tabla N°1:	Desafíos para 5G. Fuente: Elaboración propia, basado en los criterios del IMT	... 40
Tabla N°2:	Clasificación de los desvanecimientos del canal. Fuente: Basado en J. Vega (2014). Disponible en: https://desvanecimientosradioenlaces.wikispaces.com/Tipos+de+D+esvanecimiento	... 45
Tabla N°3:	Requisitos para el modelado de canales 5G Fuente: Adaptado de A Osseiran, J. Monserrat y P. Marsch (2016). "Mobile and Wirelles Communicactions Technology"	... 56
Tabla N°4:	Escenarios de propagación según 3GPP. Fuente: Adaptado de TR 38.901 version 14	... 57
Tabla N°5:	Velocidad típica del móvil de acuerdo al tipo de escenario. Fuente: UIT-R P.1411-2	... 58
Tabla N°6:	Tipos de células típicas en la propagación en exteriores de trayecto corto. Fuente: UIT-R P.1411-2	... 59
Tabla N°7:	Cálculo de pérdida de propagación, shadown fading y probabilidad de tener línea de vista para un escenario Macrourbano para el modelo ITU. Fuente: Extraído del documento oficial ITU-R (M.2412-0 , 2017)	... 62
Tabla N°8:	Cálculo de pérdida de propagación, shadown fading y probabilidad de tener línea de vista para un escenario Macrourbano para el modelo 3GPP. Fuente: Extraído del documento oficial del 3GPP (TR 38.900 versión 14.2.0, 2017)	... 64
Tabla N°9:	Tabla de variables del escenario.. Fuente: Elaboración propia	... 75
Tabla N°10:	Variable independiente. Fuente: Elaboración propia	... 76
Tabla N°11:	Variable dependiente. Fuente: Elaboración propia	... 77
Tabla N°12:	Características de la antena. Fuente: Elaboración propia	... 80

Tabla N°13:	Resumen de elementos utilizados de Unity.	... 84
	Fuente: Elaboración propia	
Tabla N°14:	Porcentajes de aciertos para los modelos ITU, 3GPP y METIS.	... 93
	Fuente: Elaboración propia	
Tabla N°15:	Casos de las mediciones. Fuente: Elaboración propia	... 94

RESUMEN

Esta investigación aborda el estudio y la evaluación de los modelos de pérdida de propagación para los sistemas de comunicación móvil de Quinta Generación (5G) que están siendo desarrollados por los principales proyectos y grupos de investigación a nivel mundial como el 3rd Generation Partnership Project (3GPP), International Mobile Telecommunications 2020 (IMT-2020) y Mobile and Wireless Communications Enablers for Twenty –Twenty Information Society (METIS). Los canales de radio objeto de este estudio corresponden a entornos urbano-densos en las bandas 28 GHz y 73 GHz para caracterizar la propagación a gran escala. En ese sentido, se ha considerado como escenario de simulación realista 3D al centro comercial Gamarra, el cual se encuentra en el distrito de La Victoria en Lima-Perú, por presentar tales características.

Cabe mencionar que los modelos de pérdida de propagación a gran escala en bandas milimétricas proporcionan una caracterización más compleja para el tipo de servicios y retos que 5G promete soportar a diferencia de los modelos en bandas inferiores a 6GHz.

La investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo e incluye fenómenos asociados al canal de radio con línea de vista (LOS) y sin línea de vista (NLOS), donde las pérdidas de propagación son obtenidas usando los modelos de canal. Finalmente, los resultados son evaluados en las bandas de frecuencia mencionadas partiendo de un escenario real.

Palabras clave—3GPP, IMT, METIS, fading, shadowing.

ABSTRACT

The present research encompass the study and evaluation of the propagation loss models for the Fifth Generation mobile communication systems (5G) that are being developed by the main projects and research groups worldwide: 3rd Generation Partnership Project (3GPP), International Mobile Telecommunications 2020 and Mobile and Wireless Communications Enablers for Twenty-Information Society (METIS). The radio channels objects of this study correspond to urban dense environments in the 28GHz and 73GHz bands and serve to characterize large-scale propagation.

In that sense, Gamarra Shopping Center, located in the district of La Victoria in Lima-Peru, has been considered as a realistic 3D simulation scenario for the for presenting such characteristics.

It should be mentioned that large-escale propagation loss models in millimeter bands provide a more accurate characterization for the type of services that 5G promises to support, unlike the models in bands below 6GHz.

The research is developed under a quantitative approach and includes phenomena associated with the line of sight and without line of sight radio channel, where the propagation losses are obtained using the channel models, finally, the results are compared in the frequency bands mentioned starting from a real scenario.

Keywords—3GPP, IMT, METIS, fading, shadowing.

CAPÍTULO 1

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El éxito de las tecnologías celulares demanda cada vez mayor tráfico de datos, mejores servicios, nuevas funcionalidades de red, pero principalmente afrontar las limitaciones de los recursos espectrales escasos (R. Theodore, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Avar, K. Wang, G. Wong, J. Schulz, M. Samimi y F. Gutierrez, 2013). De modo que se hace importante considerar la manera como se modela el medio de propagación en el cual se encuentra inmerso un sistema particular de acuerdo con los requisitos que presenta cada generación de tecnología celular, pues con ello se mejoraría la exactitud de los procedimientos de predicción de cobertura (P. Zhouyue y K. Farooq, 2011).

Una de las claves para el desarrollo y la implementación de los sistemas de quinta generación (5G), el cual está orientado, entre otras, al Internet de las Cosas (IoT), consiste en resolver problemas asociados a la propagación de las señales en el rango de ondas milimétricas, los cuales requieren nuevos modelos de propagación del canal radio para determinar las verdaderas prestaciones de esta tecnología.

El estudio de pérdidas de propagación permitirá evaluar el desempeño de las futuras redes móviles que operan en las bandas milimétricas sobre un conjunto de escenarios y permitirá atender el conjunto de requerimientos de la 5G como son las altas tasas de transmisión de datos, ultra alta capacidad, conectividad masiva, ultra baja latencia, ultra alta confiabilidad y ultra bajo consumo de energía (M. Zheng, Z. Zhengquan, D. Zhiguo, F. Pingzhi y L. Hengchao, 2015) y (Ericsson, 2015).

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 PROBLEMA GENERAL

¿ Los modelos de pérdida de propagación semi determinísticos permiten una adecuada caracterización de canal de radio en las bandas sobre los 6GHz en comparación a los modelos estocásticos en un escenario urbano denso?

1.2.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- a) ¿Es importante contar con un modelo 3D del escenario para caracterizar el comportamiento del canal de radio en las bandas de 28 y 73 GHz?
- b) ¿La función probabilidad de los modelos estocásticos de 3GPP, IMT-2020 son adecuados para la estimación de las pérdidas de propagación en un escenario urbano denso?

1.3 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

1.3.1 HIPÓTESIS GENERAL

La simulación de los modelos de pérdida de propagación a gran escala semi deterministas para la red de comunicaciones móviles de quinta generación permitirán evaluar adecuadamente las prestaciones y desempeño de esta tecnología.

1.3.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- a) La simulación de un escenario realista 3D, permitirá caracterizar el comportamiento del canal de radio en las bandas de 28GHz y 73GHz para el Centro Comercial de Gamarra en el distrito de La Victoria, Lima-Perú.
- b) En un escenario real, el modelo de pérdidas de propagación de METIS basado en mapas reduce el error de las funciones de probabilidad propuestos por 3GPP, IMT 2020.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Si bien es cierto, la tecnología de comunicaciones móviles 5G significa una red de acceso con mayor velocidad y menor latencia, lo importante es comprender que consecuencia traerá estas dos mejoras, que muy probablemente cambiará nuestras vidas en los próximos años de manera radical. Es aquí donde el despliegue de nuevas aplicaciones de manera masiva serán los generadores de tráfico en esta red 5G. Se prevé que estas aplicaciones serán relacionadas con ciudades inteligentes, realidad aumentada y virtual, entre otras.

Cabe mencionar que, en nuestro país, al mismo tiempo que la tecnología 4G está en plena consolidación; se está preparando en simultaneo para la introducción de esta tecnología declarando el Ministerio de Transporte y Comunicaciones las frecuencias 5G en reserva y el uso del canon (pago por el uso del espectro) para realizar la convergencia tecnológica¹.

Se necesita iniciar estudios académicos que estén relacionados con el acceso a la red móvil 5G para comprender esta tecnología e iniciar una planificación de cobertura para su futura implementación en el Perú. En ese sentido la utilidad de esta investigación radica en el análisis y evaluación de las pérdidas de propagación del canal de radio para la red de comunicaciones móviles de quinta generación 5G dentro de un entorno urbano denso.

Esta evaluación se realizará comparando resultados de pérdidas de propagación de modelos estocásticos como los propuestos por el ITU y el 3GPP, y el modelo semi determinístico como el propuesto por METIS, para varios instantes de tiempo. Los modelos estocásticos se basan en una función de probabilidad la cual puede tener error en diferentes escenarios, por otro lado, el modelo semi determinístico que analizamos está basado en mapas y al tomar en cuenta la geometría del escenario, se reduce la tasa de error para calcular la probabilidad de tener línea de vista o no; por lo tanto resulta más adecuado para calcular las pérdidas de propagación y con ello, se dará a conocer una correcta caracterización de canal de radio.

¹ MTC: Tecnología 5G para Internet se encuentra en estudio”, 17 de julio de 2018.
<https://elcomercio.pe/economia/peru/mtc-tecnologia-5g-internet-encuentra-estudios-noticia-536908>

Además de ello, la culminación de la investigación nos permitirá conocer las verdaderas prestaciones de los sistemas móviles de quinta generación en su eventual despliegue en nuestro país; para ello se simula en 3D, como referencia, al Centro Comercial Gamarra, ubicado en el distrito de La Victoria en Lima-Perú. Ello permitirá realizar un mejor diseño, planificación, así como una adecuada predicción de cobertura y por ende se optimizaría el uso de frecuencias.

1.5 ANTECEDENTES

Existe una gran variedad de modelos de canal de propagación los cuales han ido evolucionando con el desarrollo de las comunicaciones móviles. Estos modelos van desde los más simples, cuyo cálculo se efectuaba mediante métodos empíricos y en bandas tradicionales es decir, por debajo de 6GHz, hasta modelos más sofisticados que utilizan herramientas complejas que operan en bandas milimétricas.

J. Rábanos (1998) señala que con la progresiva reducción del radio de cobertura (evolución desde las macroceldas hasta las picoceldas) se plantean nuevos problemas de cálculo los cuales ya no se limitan a la pérdida básica de propagación sino que se extienden a la caracterización del canal en banda, estimación de perfiles de retardo de potencia (PDP) y características Doppler; siendo de subrayar la mayor exigencia de precisión a consecuencia del pequeño radio de cobertura.

Es así como actualmente el interés por operar en bandas milimétricas para cumplir con los beneficios que ofrece 5G, supone el estudio de modelos de propagación con enfoque al concepto de “ingeniería a medida” es decir un estudio detallado celda por celda.

Se han realizado estudios previos de la caracterización de canales en bandas milimétricas, entre los que podemos indicar a los siguientes:

- a) J. Lee, J. Liang, M.-D. Kim, J.-J. Park, B. Park y H. Kyu Chung (2016) presentan características de propagación de mmWave y parámetros de modelo de canal incluyendo pérdidas de trayecto, retardo y propiedades angulares basadas en datos de medición de campo de 28 GHz y 38 GHz tanto en ambientes interiores como exteriores

y son comparados con los parámetros medidos en bandas de bajo de 6GHz usando el modelo de espacio libre como el modelo de alfa-beta-gamma.

- b) El grupo mmMAGIC (2016) en el entregable D2.1 se describen las mediciones de los primeros canales y los resultados de las evaluaciones realizadas en el proyecto mmMAGIC. Además, propone un modelo de canal inicial como base para las investigaciones a nivel de enlace y de sistema. Es compatible con el modelo 3GPP-3D, además de proporcionar varias extensiones para soportar la gama de frecuencias de ondas milimétricas. En su investigación además se abordan nuevos enfoques de modelado para aspectos específicos de la propagación de ondas milimétricas como bloqueo y agrupación.
- c) Hay muchos otros esfuerzos de campañas existentes y en curso en todo el mundo que apuntan a mediciones y modelado de canales 5G, los cuales incluyen por ejemplo al proyecto METIS2020 en el Deliverable D8.4 (2015) el cual es un modelo basado en las características geométricas del espacio que puede satisfacer el requisito de flexibilidad y escalabilidad. Otro es el modelo COST (R. Verdone y A. Zanella, 2012), un modelo de canal que puede reproducir las propiedades estocásticas de múltiples canales de entrada y múltiple salida (MIMO) a lo largo del tiempo, la frecuencia y el espacio. También campañas como (ETSI mmWave, 2015) y (NIST 5G, 2019).
- d) W. Roh, J. Yun Seol y J. Park (2014) describen los resultados de las campañas de medición y desarrollo de algoritmos de la compañía Samsung en ambientes interiores y exteriores para afirmar la viabilidad de las bandas milimétricas para el uso celular.
- e) T. Rappaport, Y. Xing, G. MacCartney, A. Molisch, E. Mellios y J. Zhang (2017) presentan los primeros resultados y los conceptos clave de las redes 5G y se describen los esfuerzos de modelado de canales de muchos grupos internacionales para aplicaciones licenciadas y sin licencia, se comparan en el rango de 0,5-100 GHz según el modelo de varios cuerpos de estandarización.

A diferencia de las campañas experimentales, los siguientes estudios realizan validaciones usando Ray tracing con softwares de simulación como Matlab o Unity 3D.

- f) Z. Yun y M. Iskander (2015) revisan los conceptos básicos de rayos, algoritmos de trazado de rayos y propagación de radio Ray tracing. En el artículo también se discute los avances más recientes y una perspectiva futura del trazado de rayos.
- g) A. Navarro, D. Guevara y J. Gómez (2014) presenta predicciones basadas en el uso de herramientas computacionales que mejoran cada vez los tiempos de respuesta con precisiones aceptables.
- h) M Samimi y T. Rappaport (2016) presentan un modelo de respuesta de impulso de canal estadístico (IR) en 3-D para la línea de visión urbana (LOS) y canales no-LOS desarrollados a partir de mediciones de propagación de ultra banda de 28 y 73 GHz en Nueva York, útiles en el diseño de los sistemas inalámbricos 5G que funcionarán tanto en el espectro de frecuencia ultra elevada, microondas como en ondas milimétricas (mmWave) para aumentar las capacidades de los canales.
- i) K. Haneda, et al. (2016) presenta una descripción preliminar de los modelos de canales 5G para bandas de 6 GHz hasta 100 GHz. Este documento describe un modelo de canal 3D inicial que incluye: 1) escenarios de despliegue típicos para microcélulas urbanas (UMi) y macrocélulas urbanas (UMa) y 2) un modelo de referencia para incorporar pérdida de trayectoria, desvanecimiento de sombras, posibilidad de tener línea de visión y penetración para los escenarios típicos.
- j) La ITU (2015) en el informe ITU-R M.2376-0 proporciona información respecto a la viabilidad técnica de las IMT en las bandas milimétricas entre 6 GHz y 100 GHz. La viabilidad técnica incluye información sobre los sistemas actuales de IMT, su evolución, potencialidades de las nuevas tecnologías de interfaz de radio IMT y enfoques de sistema podrían ser apropiados para operar en bandas entre 6 GHz y 100 GHz.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar y simular los modelos de propagación a gran escala para la red de comunicaciones móviles de quinta generación “5G” en un entorno urbano denso propuestos por los principales grupos de investigación: 3GPP, IMT-2020 y METIS.

1.6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Comparar el comportamiento del canal de radio para la red de comunicaciones móviles de quinta generación 5G considerando como escenario de simulación 3D el Centro Comercial de Gamarra, Distrito de La Victoria, Lima-Perú.
- b) Analizar los resultados obtenidos en la simulación de las pérdidas de propagación realizados en bandas milimétricas entre modelos de propagación propuestos por el 3GPP, IMT-Advanced y METIS en escenarios con línea de vista y sin línea de vista para el Centro Comercial de Gamarra, Distrito de La Victoria, Lima-Perú.

1.7 METODOLOGÍA

1.7.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El desarrollo de la investigación es realizado desde un enfoque cuantitativo pues se recolectan datos como alturas de los edificios, distancias entre las calles y características del escenario para probar la hipótesis en base a mediciones numéricas y a una simulación del terreno a escala en la plataforma Unity el cual ha sido programado usando análisis matemático para que nos arroje las pérdidas de propagación dependiendo de la ubicación de nuestro objeto móvil a fin de establecer patrones de comportamiento partiendo de una realidad objetiva y así poder describir, explicar y predecir fenómenos asociados a las pérdidas de propagación como se resume en la figura 1:



Figura 1: Flujo de metodología de la investigación

Fuente: Elaboración propia

1.7.2 DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO

En la primera parte de la investigación se estudia las características de la propagación de las señales y los problemas asociados a ello. Luego se estudia de manera exhaustiva las actuales propuestas de modelos de pérdidas de propagación del canal de radio mediante el análisis de los libros, artículos de investigación e internet.

En la segunda parte de la investigación se identifica un escenario dentro de la zona urbana de Lima para realizar la evaluación de los modelos de canal radio, en este caso el centro comercial de Gamarra ubicado en el distrito de La Victoria es el lugar seleccionado. Para ello se recopila información cartográfica del lugar a fin de determinar la geometría del escenario, la ubicación de la antena y la evaluación de la pérdida de propagación en un punto con y sin línea de vista.

La tercera parte de la investigación conlleva una serie de procedimientos de análisis matemático, mediciones, simulación, análisis de datos y pruebas, que involucran el uso de funciones de probabilidad, simulaciones para superficies en 3D utilizando la herramienta computacional llamada Unity; todo ello, apoyado en la documentación científica sobre el tema. Finalmente, los resultados obtenidos de estos tres modelos (3GPP, IMT-2020 y METIS) serán comparados y se explicará las conclusiones del caso.

1.8 LIMITACIONES DEL ESTUDIO

- a) La obtención de las medidas de los edificios se hace difícil en las calles de gran concurrencia de personas, así como la altura real de algunas construcciones debido a

que los dueños de las tiendas construyen algunos almacenes temporales en sus azoteas.

- b) El diseño y simulación del escenario de Centro Comercial de Gamarra dentro de la plataforma Unity 3D es muy lento y requiere gran capacidad de procesamiento del CPU.
- c) Las simulaciones consumen gran parte de los recursos del CPU.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 QUINTA GENERACIÓN (5G)

La 5G está en fase de estandarización por los organismos de normalización. Rohde&Schwarz (2016) señala que será un sistema de datos destinado a cumplir con los desafíos como gran ancho de banda, ultra baja latencia, ultra alta velocidad de transmisión de datos, escalabilidad, eficiencia energética, rendimiento de la batería en los equipos, operación en entornos congestionados, conexiones D2D, M2M, V2V entre otros. ONF (2012), menciona que estas características requieren innovaciones en el circuito, nuevo tratamiento de señal, aumento en la ganancia de la antena, tecnologías de comunicación como redes definidas por software (SDN) y arquitectura de red basada en la nube (C-RAN) para contrarrestar el costo de operación y el mantenimiento elevado demandan las actuales tecnologías que usan múltiples RAT².

Ello se logrará haciendo uso de las bandas milimétricas, multi agregación de portadora, uso de MIMO masivo y técnicas que hagan competente este servicio mejorando la eficiencia espectral. Entre las técnicas competitivas que podrían ser empleadas en los futuros sistemas de quinta generación para satisfacer todas las ventajas que ofrece, están NOMA³ de múltiple entrada y múltiple salida, SCMA⁴, el uso de redes definidas por software (SDN) basado en arquitecturas de redes basadas en la nube (C-RAN) tanto para la red de transporte como para el Core. En la figura 2.1 se ilustra la visión de los desempeños de la tecnología 5G por la empresa Nokia.

² Radio Access Technologies

³ Acceso múltiple no ortogonal

⁴ Acceso múltiple de código escaso

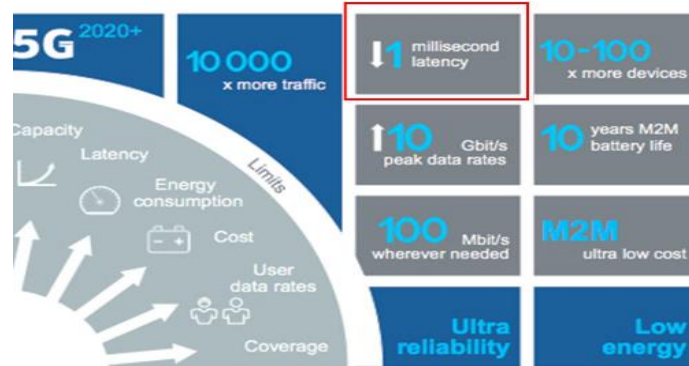


Figura 2.1: Visión de los desempeños resumidos por Nokia

Fuente: Web IEEE Future directions (2018)

2.1.1 GRUPOS DE TRABAJO Y ROADMAPS

El incremento exponencial del tráfico móvil genera especial interés en altas frecuencias, en el orden de los GHz. Lo que ha motivado el desarrollo de distintos modelos de propagación para cada candidato de banda.

Actualmente diferentes organizaciones y grupos de trabajo orientados al desarrollo de 5G están definiendo el proceso de entregables de los futuros sistemas de Quinta Generación que comprende requisitos del espectro y las necesidades de acceder a estos. Cabe mencionar que la formación de alianzas estratégicas entre empresas de telecomunicaciones, operadoras telefónicas y universidades, ha sido esencial en el intercambio de los resultados que cada una ha ido obteniendo en sus pruebas tanto de software como hardware.

2.1.1.1 CUERPO NORMATIVO:

a) La ITU (Unión Internacional de las Telecomunicaciones)

La ITU para 5G tiene como objetivo preparar el escenario para las actividades de investigación 5G que están surgiendo en todo el mundo mediante el liderazgo del grupo de trabajo 5D⁵.

⁵ 5D: Grupo de trabajo de la ITU que trabaja en la definición de las nuevas interfaces de radio 5G.
<https://www.itu.int/md/R15-WP5D/new/en>

Los avances de este grupo serán decisivos para establecer la agenda de la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones del 2019. Cabe mencionar que la ITU trabaja en conjunto con:

ITU-T: Encargado de la estandarización de los aspectos de red y servicios de telecomunicaciones.

ITU-R: Encargado de la gestión global del espectro radioeléctrico y de la estandarización de las radiocomunicaciones. Este grupo está desarrollando las especificaciones para los sistemas de telecomunicaciones móviles internacionales (IMT 2020).

En la resolución UIT-R 56, las IMT-Avanzadas y las IMT-2000 se conocen colectivamente por su nombre raíz, IMT.

ITU-D: Encargado de promover y ayudar a la extensión de las TICs a todos los habitantes del mundo, reduciendo la brecha digital. El plan de trabajo de la ITU enfocado al desarrollo de 5G se ilustra en la figura 2.2.

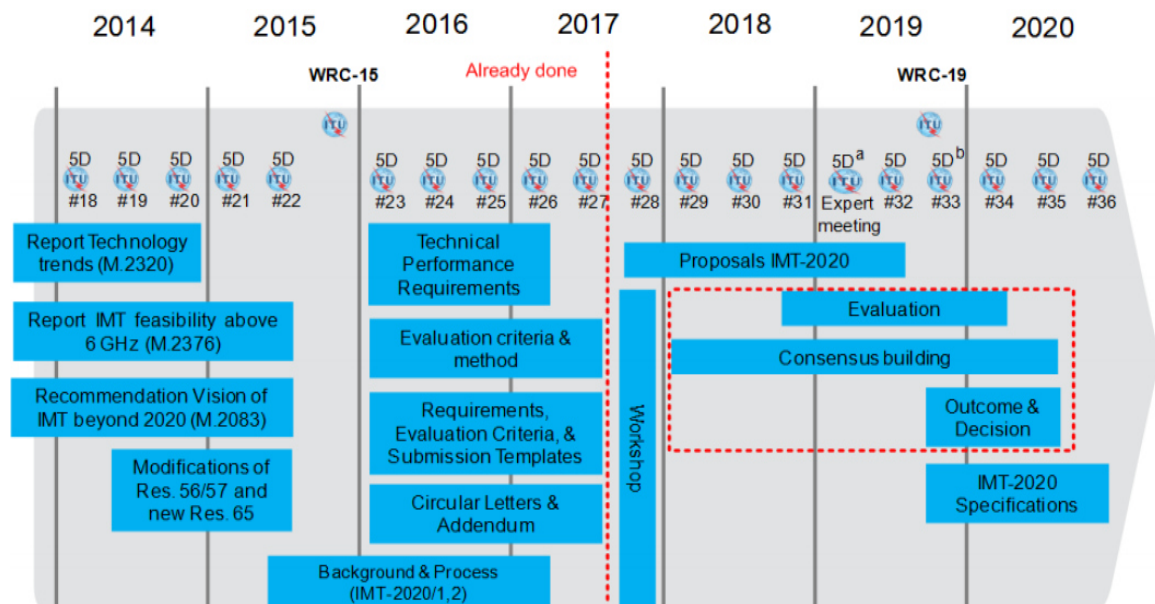


Figura 2.2: Línea de tiempo más reciente expuesta por Dr. Ying Peng (DATANG)

Fuente: Workshop on IMT-2020 terrestrial radio interfaces (2017)

b) El 3GPP-5G (3rd Generation Partnership Project)

El 3GPP produce especificaciones técnicas que los organismos de normalización incorporarán en entregas apropiadas (por ejemplo, estándares). El 3GPP pretende enviar la propuesta técnica inicial WP5D en junio del 2019 en la reunión #32 de la UIT-R y los planes para proporcionar la especificación detallada en octubre de 2020 en la reunión #36.

Son siete los socios del 3GPP de Asia, Europa y América del Norte los cuales determinan la política general y la estrategia de 3GPP.

Algunas partes de las posibles redes 5G se están incorporando a la versión 14 de 3GPP. La fase 1 de 5G partirá en la Versión 15 la cual fue completada a finales del 2018 y luego en las especificaciones de Fase 2, Release 16 de 5G que será completada para final del 2020. El plan de trabajo del 3GPP enfocado al desarrollo de 5G se ilustra en la figura 2.3.

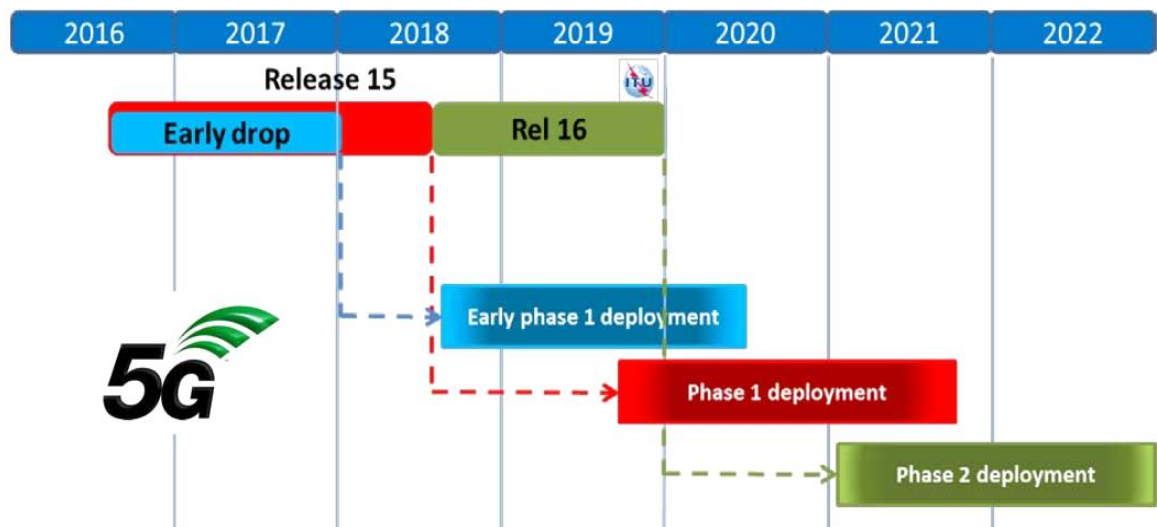


Figura 2.3: Línea de tiempo más reciente expuesta por Giovanni Romano, Grupo UIT-R.

Fuente: Workshop on IMT-2020 terrestrial radio interfaces (2017)

2.1.1.2 EMPRESAS DE TECNOLOGÍA MÁS RELEVANTES DEL SECTOR:

Diferentes empresas han invertido en test de campo y de laboratorio a fin de poner en práctica 5G; las más relevantes son: Ericsson, Nokia, Huawei, NTT Docomo, Alcatel, Samsung Electronics, ATT, ZTE, Qualcomm y Orange.

2.1.1.3 OTROS GRUPOS:

5G Américas, NGMN Alliance, iJOIN, Mobile Cloud Networking, entre otros.

2.1.2 ONDAS DE RADIO

Las ondas de radio son un tipo de ondas electromagnéticas que permiten la transmisión de información. Su clasificación se detalla en la figura 2.4.

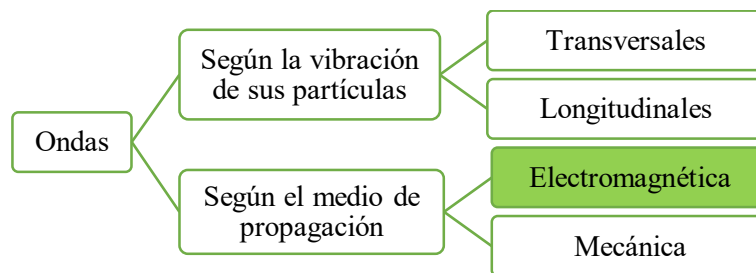


Figura 2.4: Clasificación de las ondas de radio

Fuente: Elaboración propia basado en la teoría de ondas

2.1.3 ONDAS MILIMÉTRICAS (mmW)

La industria a menudo utiliza el término mmWave para definir las frecuencias entre 10 y 300GHz. Este espectro puede utilizarse para comunicaciones inalámbricas de alta velocidad como se observa con el último estándar Wi-Fi 802.11ad (operando a 60 GHz) donde los sistemas celulares de quinta generación 5G abarcarían frecuencias de alrededor de 500 MHz hasta 100 GHz.

Las ondas milimétricas tienen alta atenuación atmosférica y son absorbidas por gases en la atmósfera lo que reduce el alcance y la potencia de las ondas, además que la lluvia y la

humedad pueden afectar el rendimiento y reducir la intensidad de la señal, como se muestra en la figura 2.5.

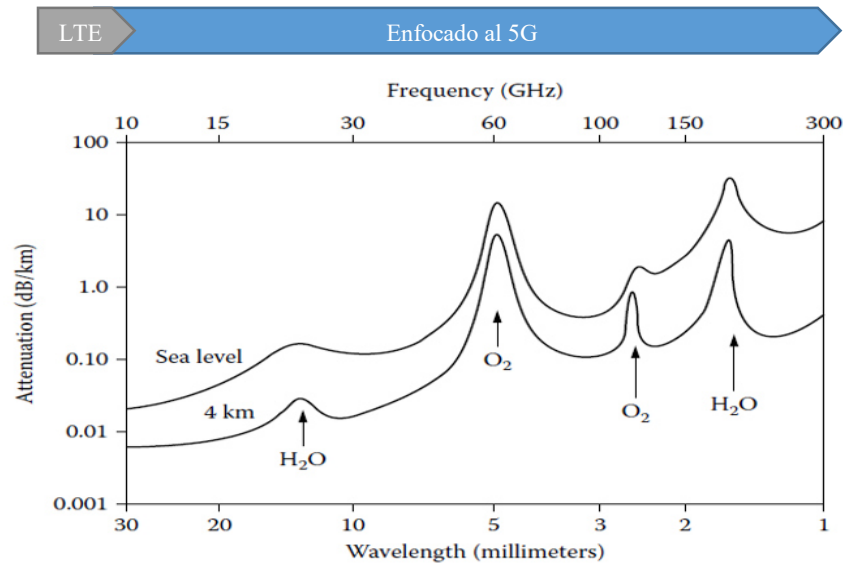


Figura 2.5: Espectro de ondas milimétricas

Fuente: Millimeter Wave Technology in Wireless PAN, LAN and MAN (2008)

S. Xiao, M. Zhou y Y. Zhang (2008) afirman que debido a su corto alcance, de alrededor de un kilómetro, la onda milimétrica viaja por línea de vista, por lo que sus longitudes de onda de alta frecuencia pueden ser bloqueadas por objetos físicos como edificios y árboles. Aún con todo esto, las ondas milimétricas son utilizadas para una variedad de servicios en redes móviles ya que permite velocidades de datos más altas de hasta 10Gbps y la elección de la banda de frecuencia conducirá a un enorme aumento de la capacidad en el área cubierta. Cabe mencionar además que las bandas de microondas de 3 GHz-30 GHz son relevantes para cumplir los requisitos extremos para 5G.

2.1.4 CANAL DE RADIO

T. Rappaport et. Al (2001), menciona que el canal de radio tiene asignado una banda de frecuencias para el tipo de trabajo a emplear en una comunicación, pudiendo ser esta, para su uso en recepción, transmisión o para ambas, sean simplex (se utilizará la misma frecuencia tanto para transmisión como para recepción) o dúplex (se utilizará una frecuencia para transmitir y otra para recibir). A menudo, la complejidad y la variabilidad del canal de radio

hace que sea difícil obtener un modelo de canal determinista preciso por ello, para predecir las características de propagación en entornos con geometría bastante regulares y propiedades dieléctricas uniforme, se utilizan frecuentemente modelos estadísticos y para los entornos que cambian dramáticamente existen herramientas de modelado asistidas por computadora.

M. Shafl et. (2018) refiere: *“In order to meet the high data rate requirements of fifth generation (5G) cellular systems (20 Gb/s), large bandwidths (up to 1 GHz) are needed that are not available in the sub-6 GHz (microwave) frequency bands. The millimeter-wave (mmWave) bands (30–300 GHz) are relatively unused, and have large available bandwidths attracting a lot of interest for 5G cellular access. However, the nature of radio propagation between microwave and mmWave frequencies is different, and this has a wide ranging impact on all system aspects — in particular, System performance, equipment design, signal processing requirements, and fundamental architectures of both the base station (BS) as well as the user equipment (UE).performance, equipment design, signal processing requirements, and fundamental architectures of both the base station (BS) as well as the user equipment (UE)”*

“Para cumplir con los requisitos de alta velocidad de datos de los sistemas celulares de quinta generación (5G) (20 Gb/s), se necesitan grandes anchos de banda (hasta 1 GHz) que no están disponibles en las bandas de frecuencia de bajo de los 6 GHz (microondas). Las bandas de onda milimétrica (mmWave) (30–300 GHz) están relativamente sin uso y tienen grandes anchos de banda disponibles que atraen mucho interés para el acceso celular 5G. Sin embargo, la naturaleza de la propagación de radio entre las frecuencias de microondas y mmWave es diferente y esto tiene un impacto amplio en todos los aspectos del sistema, en particular, el rendimiento del sistema, el diseño del equipo, los requisitos de procesamiento de señales y las arquitecturas fundamentales tanto de la estación base (BS) así como el equipo de usuario (UE).”

En resumen, un canal de propagación está determinado por diversos factores los cuales se resumen en la figura 2.6.

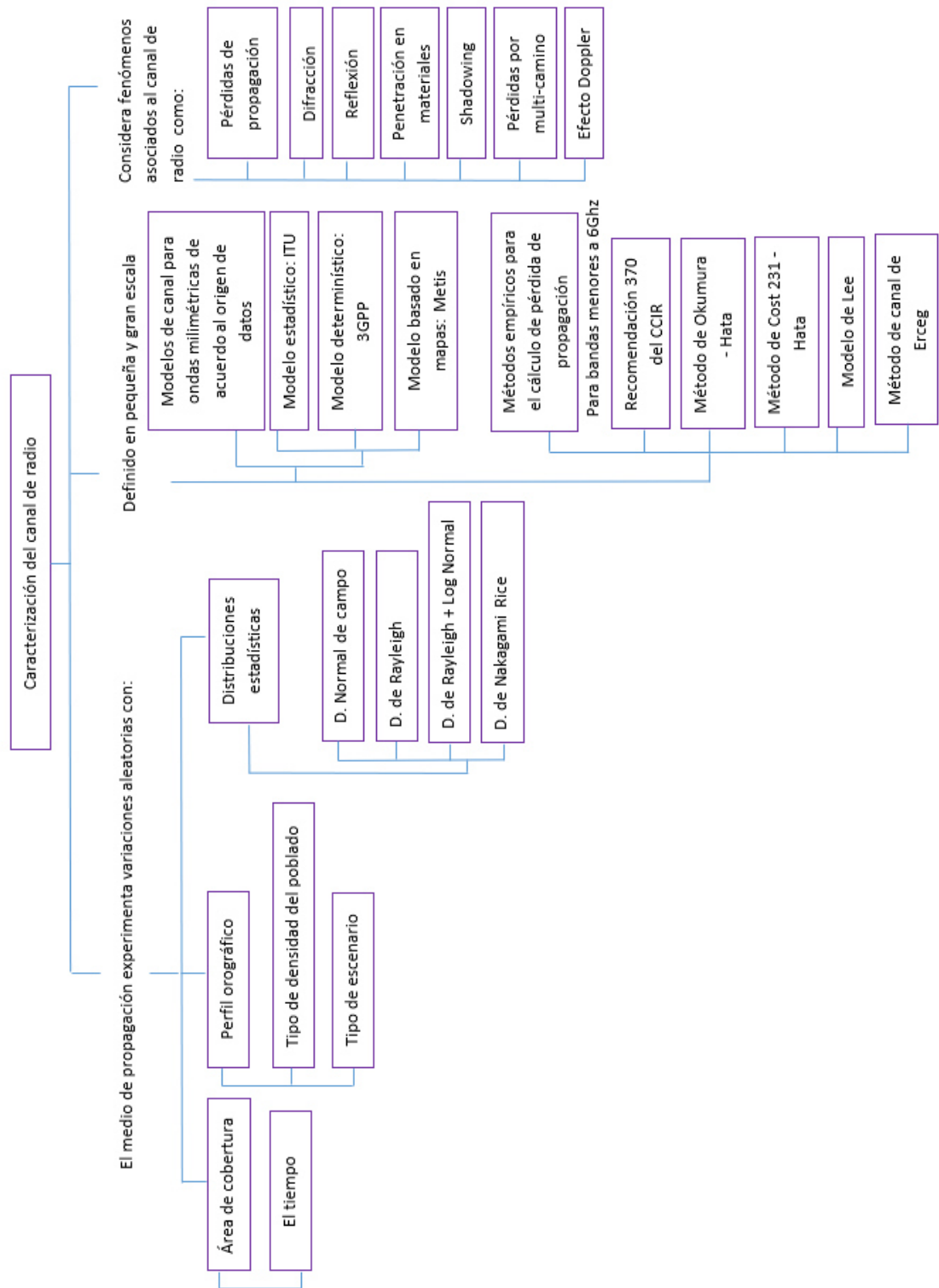


Figura 2.6: Características del canal de radio

Fuente: Elaboración propia basado en teoría de canal de radio

2.1.5 ESPECTRO RADIOELÉCTRICO

C. Johnk (2004) señala que este recurso natural y escaso, se divide en bandas de frecuencia. Sabemos que, la magnitud de la frecuencia varía inversamente proporcional con la longitud de onda y varía directamente proporcional con respecto a la energía, de ahí que las ondas con mayor frecuencia pueden transportar mayor cantidad de información.

Como referencia, el espectro radioeléctrico comprende los 3 KHz y los 300 GHz y sirve como medio de propagación de tecnologías inalámbricas como se ilustra en la figura 2.7. No obstante, existen frecuencias fuera de este rango regulado por UIT-R (por ejemplo, en infrarrojos y en luz visible, en frecuencias del orden de centenas de GHz) empleadas también para radiocomunicaciones.

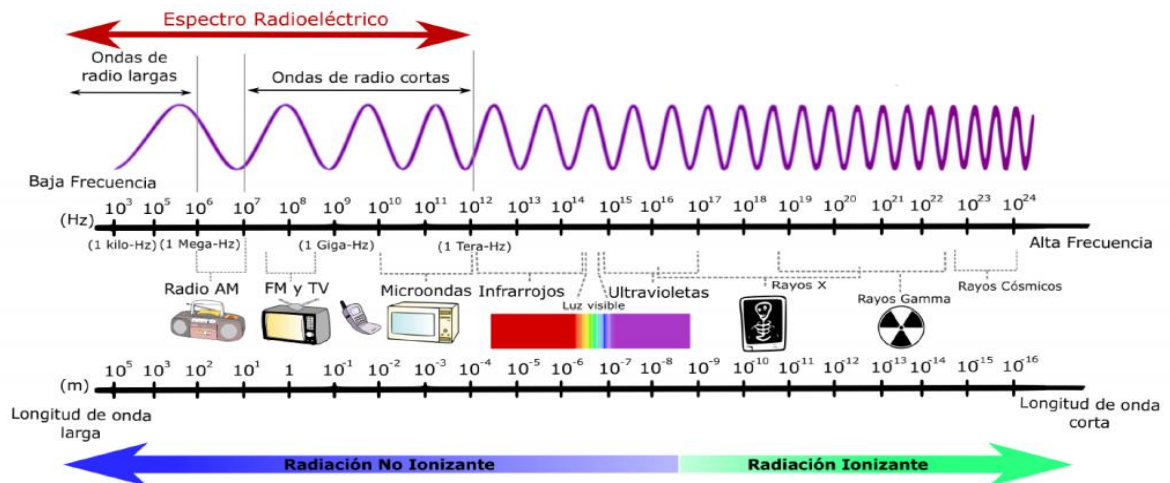


Figura 2.7: Espectro radioeléctrico

Fuente: Sitio Web Esopo (2018)

En la recomendación UIT-R V.431-7 (2000) se dan a conocer directrices para la nomenclatura de distintas bandas de frecuencia, donde cada banda tiene una nomenclatura en función a su frecuencia y tiene una abreviatura en función de su longitud de onda como se muestra en la figura 2.8.

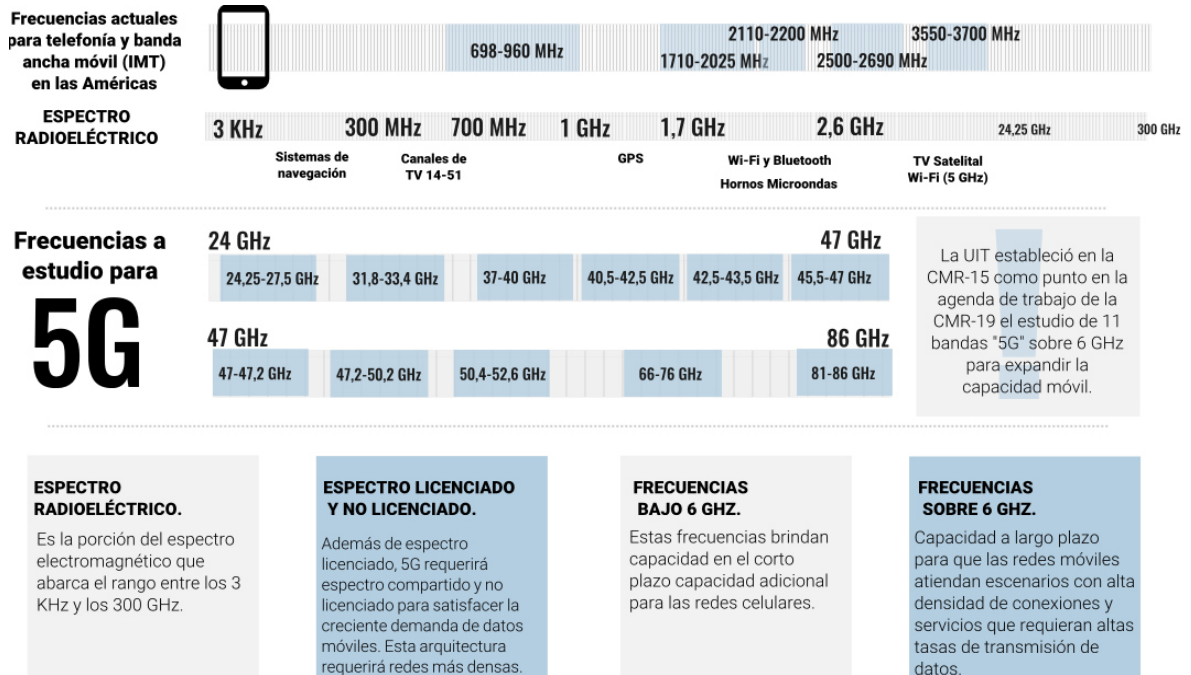


Figura 2.9: Nuevo espectro radioeléctrico para 5G

Fuente: Recomendaciones 5G Américas (2015)

Distintos grupos están identificando un conjunto de frecuencias candidatas para 5G. Dicho lo anterior, surge la pregunta ¿cómo se está manejando el espectro en bandas milimétricas?

La mayor cantidad de bandas de frecuencia inferiores a 60 GHz ya han sido atribuidas a diversos servicios, incluidos los servicios móviles; estas asignaciones se realizaron a través de tratados dentro de las tres regiones abordadas por el UIT-R en la Conferencia Mundial de Radio (CMR o WRC).

En octubre del 2015 la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) propuso nuevas reglas para la banda ancha inalámbrica en frecuencias inalámbricas por encima de 24 GHz. Por otro lado, La Unión Internacional de Telecomunicaciones y el 3GPP se han alineado en un plan de dos fases de investigación para las normas 5G donde la primera fase finalizó en septiembre del 2018. Esta fase consta de un período de investigación para frecuencias inferiores a 40 GHz para abordar el subconjunto más urgente de las necesidades comerciales. La segunda fase comenzó a final del 2018 y finalizará en diciembre del 2019 y abordará los indicadores clave dados por IMT 2020. Esta segunda fase se centra en frecuencias de hasta 100 GHz.

2.1.7 ESTADO ACTUAL DE LA 5G EN EL PERÚ

Mientras que en el mundo ya se hacen esfuerzos por definir incluso el marco de la sexta generación de redes de comunicación, sus servicios y tecnologías, el Perú aún está avanzando hacia consolidar su red 4G.

A finales del 2018 El diario el Comercio publicó⁶ *“Perú está lejos de 5G, según Chumo, porque primero tiene que migrar sus redes 2G y 3G a 4G. Para el 2025, los analistas calculan que la región ya esté con 8% de 5G y 60% de 4G. El Perú está en la media regional, pero no puede darse el lujo de tomarse un año para recuperar ganancias olvidando 5G. Por eso, el MTC inició en el 2018 un proceso de reordenamiento del espectro que implicará licitar dos bandas (2,3 GHz y 2,5 GHz) en el 2019 y reordenar la banda ideal para 5G (3,5 GHz) en el 2019 o máximo el 2020”*.

El MTC recién en agosto del 2018 aprueba el reglamento⁷ para el reordenamiento de bandas de frecuencias tradicionales para atender la demanda de 4G LTE. También se está trabajando una norma que regula el mercado secundario, es decir la “reventa de espectro” entre operadores móviles. Ello nos dice que el gran reto del 2019 para el sector de telecomunicaciones será normativo.

En julio del 2019 mediante la Resolución Ministerial N° 523-2019-MTC/01.03 se propone la identificación y canalización del rango de frecuencias 3 400 – 3 800 MHz (3.5 GHz) con el objetivo de tener disponible su asignación para servicios de telecomunicaciones móviles avanzadas (IMT). Además, se propone la canalización de las bandas en bloques de 5 MHz.

Por otro lado, las compañías más importantes de telecomunicaciones ya se alistan para la llegada de 5G al Perú con miras a transformar el negocio y convertirse en “operadores tecnológicos o digitales” por ejemplo Movistar quien en diciembre del 2017 realizó las primeras pruebas de Gigabit Class LTE en el Perú en colaboración con Samsung, Ericsson y

⁶ Información del diario el comercio del día 31.12.2018. Disponible en: <https://elcomercio.pe/economia/dia-1/telcos-alistan-5g-medio-propia-conversion-noticia-592678>

⁷ N° 634-2018 MTC/01.03 Resolución Ministerial donde el MTC aprueba el “Reglamento para el reordenamiento de bandas de frecuencias”, conocido como refarming, como la banda de 2.5GHz para licitarla el 2019.

Qualcomm, preparando así el camino para 5G. Estas pruebas fueron certificadas por un notario, superaron en 7 veces las velocidades de descarga de la tecnología 4G, señaló Renán Iglesias, gerente de Planificación de Acceso de Telefónica del Perú⁸.

2.1.8 RETOS Y TENDENCIAS

La recomendación ITU M.2376 de manera general menciona que un modelo de canal apropiado para bandas milimétricas, debe cumplir un conjunto de requisitos que incluyen los que se enumeran a continuación.

- a) Proporcionar características precisas de espacio-tiempo de los canales de propagación en espacio tridimensional (3D) para condiciones LoS⁹ y NLoS¹⁰.
- b) Soporte de conformación de haz con antenas direccionables dirigibles tanto en el lado del transmisor como en el del receptor, sin limitación en cuanto al tipo y tecnología de la antena.
- c) Tener en cuenta las características de polarización de las antenas y señales.
- d) Admitir características no estacionarias del canal de propagación que surgen del movimiento del equipo terminal y del entorno no estacionario (por ejemplo, personas en movimiento que causan la atenuación del enlace de comunicación o el bloqueo total).

Debemos tener en cuenta que la nueva red está siendo guiada por las aplicaciones y su medio es la nube, para ser más específicos el valor estaría en el Big Data más que en la conectividad, de ahí que la virtualización de la red es un aspecto clave para el desarrollo futuro de los operadores de telecomunicaciones y las OTT (Over the top). Por otra parte, si la RAN de 5G ofrecerá velocidades y capacidad exponencialmente más altas, entonces el resto de la red también se debe ajustar a los cambios, pues la RAN sólo constituye una pequeña porción de la ruta por donde viajan los datos para proporcionar conectividad, en ese sentido, se

⁸ Información de diciembre del 2017 del diario Gestión disponible en:
<https://gestion.pe/economia/empresas/movistar-realiza-pruebas-peru-tecnologia-5g-223308>

⁹ LoS: Line of site o enlace con línea de vista.

¹⁰ NLOS: Near line of site o enlace con línea de vista parcialmente obstruida.

generarían transformaciones entre los límites de Core y la red de acceso además de las nuevas redes de backhaul (MBH) y fronthaul.

MA Zheng, ZHANG ZhengQuan, DING ZhiGuo, FAN PingZhi y LI HengChao (2015) consideran la figura 2.10 como la nueva arquitectura C-RAN para 5G, la cual tiene núcleo distribuido. Menciona además que los servicios como máquinas controladas a distancia en tiempo real, conducción autónoma, realidad virtual, etc. requieren una latencia de radio de menos de 1 ms por ello la mejor forma de lograr una latencia mínima de extremo a extremo en términos de arquitectura de red sería eliminar el retraso del backhaul mediante la distribución del núcleo 5G más cercano al dispositivo móvil y colocando servidores de aplicaciones justo al lado.

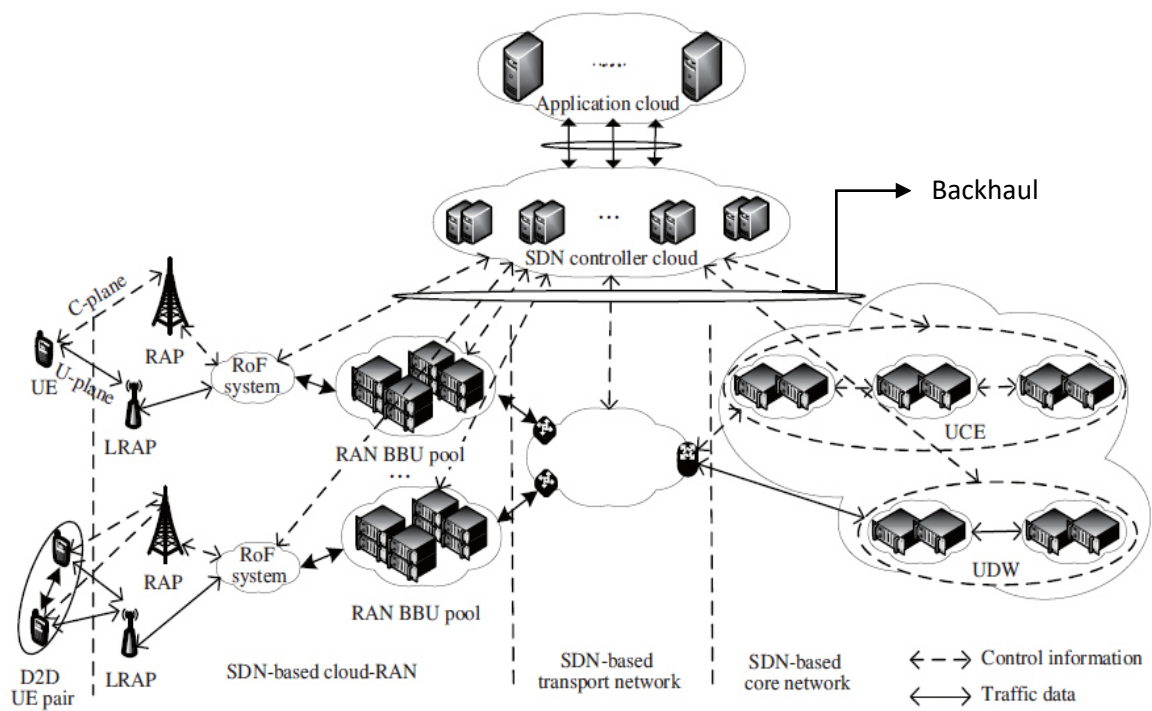


Figura 2.10: Arquitectura de Red móvil para 5G

Fuente: Key techniques for 5G wireless communications: network architecture, physical layer, and MAC layer perspectives (2015)

H. Son y M. Do (2015) explican que todo el tráfico móvil tiene que viajar a través de la red central de paquetes (es decir, PGW¹¹ en el caso de 4G). Hoy en día, la mayoría de los países tienen pocos sitios con PGW, por ejemplo, en Corea, todos los PGW están en dos sitios. Debido a las circunstancias anteriores, los operadores coreanos y globales prefieren soluciones 5G que impliquen la distribución de nodos centrales 5G cerca de los sitios celulares. Si los nodos centrales 5G se distribuyen más cerca de los sitios celulares, los servidores de contenido (o los servidores de almacenamiento en caché) se pueden colocar justo al lado del núcleo 5G distribuido. Y esto puede ayudar a reducir significativamente el tráfico de backhaul al hacer que los dispositivos móviles descarguen contenido inmediatamente del servidor de contenido sin tener que pasar el backhaul para alcanzar el núcleo 5G, como se ilustra en la figura 2.11.

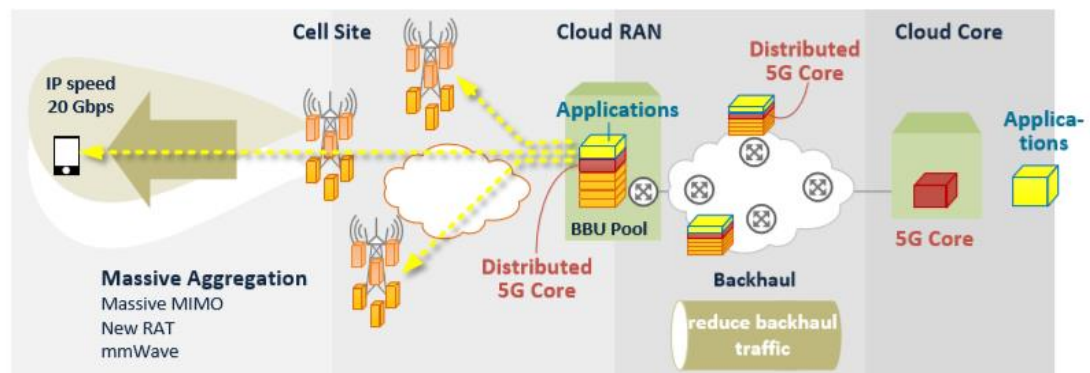


Figura 2.11: Modelo de núcleo 5G distribuido

Fuente: Netmanias Tech-Blog: Mobile Network Architecture for 5G Era - New C-RAN Architecture and Distributed 5G Core (2015)

Para la transición a la 5G serán necesarios nuevos requisitos como los resumidos en la tabla N°1. La 5G se basará en tecnologías móviles de generación anterior y aportará capacidades adicionales por ello las bandas de espectro que ya tienen licencia para los operadores móviles constituirán una base esencial para los servicios móviles 5G.

¹¹ PGW: Son las siglas de Packet Data Network Gateway y reemplaza a la funcionalidad del GGSN. Es el elemento de red que asigna las direcciones IP que utilizará cada usuario, además realiza tareas de control de los datos y de tarificación.

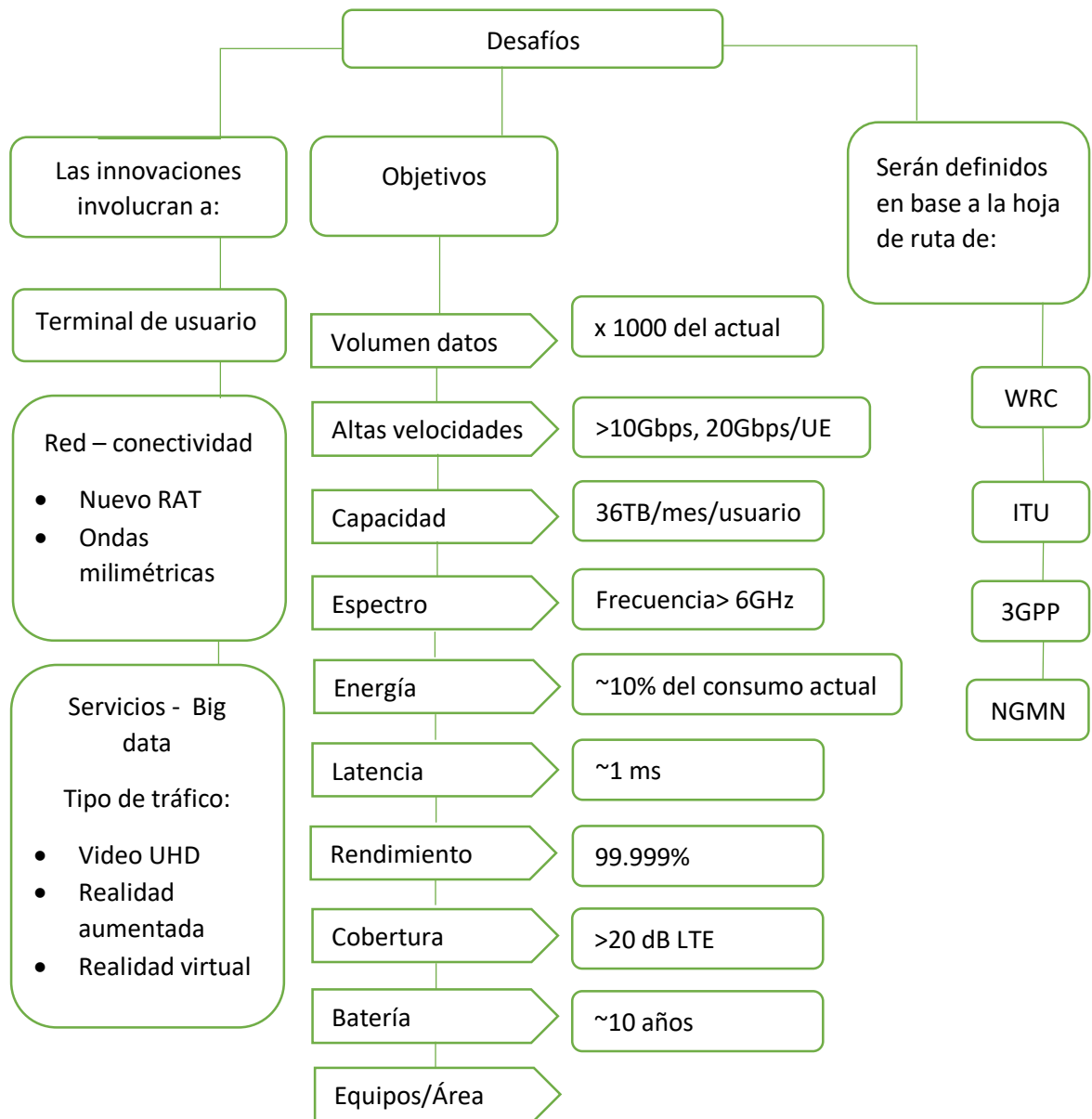


Tabla N°1: Desafíos para 5G

Fuente: Elaboración propia, basado en los criterios del IMT

2.1.9 TEOREMA DE SHANNON

Shannon estudia el caso general de un sistema de comunicación compuesto por un emisor, un receptor, un canal de transmisión y una fuente de ruido como se ilustra en la figura 2.12. Y nos dice que bajo un nivel de ruido, mayor es la tasa de errores a medida que aumenta la velocidad de transmisión.

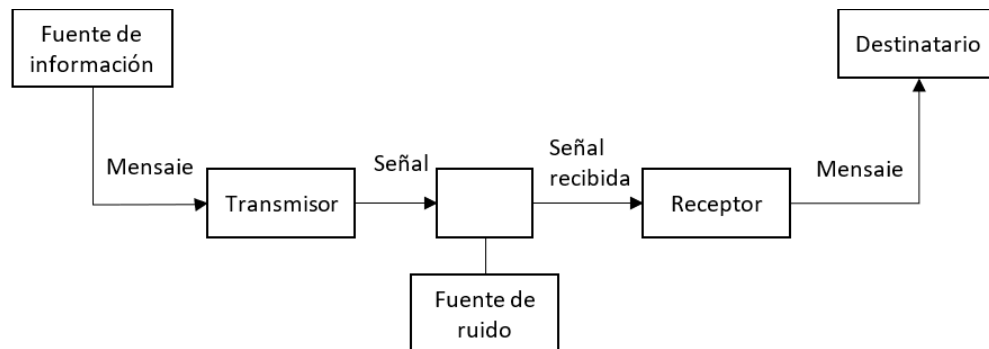


Figura 2.12: Diagrama general de un sistema de comunicaciones

Fuente: Adaptado de Shannon (1949)

El teorema de Shannon establece la máxima cantidad de datos digitales que pueden ser transmitidos sin error sobre dicho enlace de comunicaciones con un ancho de banda específico y que a diferencia del teorema de Nyquist, este considera estar sometido a presencia de la interferencia del ruido.

El teorema de Shannon-Hartley (1949) describe que la capacidad del canal “C” está definido por:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad \dots (1)$$

Donde:

B: ancho de banda del canal expresado en Hertz.

C: capacidad del canal o tasa de bits de información, expresado en bit/s.

S: potencia de la señal útil y puede estar expresada en W, mW, etc.

N: potencia del ruido presente en el canal y puede ser expresada en mW, μW , etc.

2.1.10 INTERFERENCIA CO-CANAL

Es la interferencia que puede introducirse en celdas vecinas cuando se reutilizan frecuencias en un área, ello determina las velocidades de datos y las BER¹² correspondientes disponibles para cada usuario. Puede combatirse incrementando la potencia de un transmisor y las celdas deben estar físicamente separadas por una distancia mínima que proporcione suficiente aislamiento, cabe mencionar que el control riguroso de la potencia es difícil de mantener en un entorno que se desvanece y es uno de los principales desafíos del acceso múltiple de amplio espectro, por ello un buen diseño utiliza la asignación dinámica de recursos en el sistema celular, donde la potencia y el ancho de banda se asignan en función de las condiciones de propagación, las demandas del usuario y el tráfico del Sistema (L. Scricca, 2013).

2.1.11 RELACIÓN DE LA SEÑAL-RUIDO

La relación señal a ruido más interferencia (SNIR) es la relación existente entre la potencia de la señal transmitida y la potencia del ruido que la corrompe. Su unidad de medida es el decibelio y su expresión matemática está dada por:

$$SNIR(X) = \frac{P}{1+N} \dots (2)$$

Donde:

I: Es la señal de interferencia, para este caso la interferencia será igual a 0 al existir una sola antena transmisora.

N: Ruido

P: Potencia de la señal recibida, se expresa en dB y se define como:

$$P = T_x - P_L \dots (3)$$

Donde:

T_x: Es la potencia de transmisión de la antena.

P_L: Son las pérdidas por las trayectorias.

¹² BER: Bit Error Rate o tasa de error binario.

2.1.12 TECNOLOGÍA RADIOCOGNITIVA Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

La eficiencia energética (EE) jugará un papel importante en la historia de éxito de la tecnología radio cognitiva (RC) en redes 5G. Varias funcionalidades de RC, como la detección de espectro, la gestión del espectro y la transferencia, pueden tener un consumo de energía considerable. EE en RC para redes 5G puede lograrse de dos formas según A. Pirmoradian (2013):

- a) Haciendo que las funcionalidades de RC sean eficientes en energía.
- b) Aprovechando la inteligencia y cognición de RC para ofrecer EE mejorado en los sistemas de comunicación 5G

Green Cognitive Radios (GCR) se ocupará de la escasez de espectro y del consumo de energía en la nueva tecnología de CR. La optimización de energía se requiere en cada etapa del ciclo de cognición, que incluye los procesos de detección, toma de decisiones y actuación, ello se logra a través de varios algoritmos de eficiencia energética usando la información de canal con licencia disponible y las políticas regulatorias locales.

Componentes de un terminal radio cognitivo:

- a) Radio definido por software; es el componente principal de un dispositivo cognitivo. El dispositivo SDR es un terminal reconfigurable basado en software y construido con dispositivos programables como procesadores de señal digital (DSP), arreglos de compuertas programables en el campo (FPGA), convertidor ADC / DAC analógico precisos y avanzados, amplificadores reconfigurables, antenas inteligentes y circuitos de radiofrecuencia (RF) multibanda. Entre las principales características de los dispositivos SDR pueden mencionarse:
 - Comunicación omnipresente transparente.
 - Re-configurabilidad; pues es capaz de cambiar todos sus parámetros de radio basados en políticas internas y externas.
 - Interoperabilidad; pues capaz de explorar diversas redes inalámbricas y comunicarse con ellas.

- Acercarse a la calidad de servicio deseada; ya que mejora la calidad del servicio de acuerdo con la tasa de datos y la tarifa.
 - Reducir el tiempo y el costo de los operadores para desplegar nuevas tecnologías.
- b) Geolocalizador; algunos CR utilizan el conocimiento de la ubicación del transmisor, que es proporcionado por un geolocalizador como un receptor GPS, para tomar decisiones apropiadas.
 - c) Sistema de aprendizaje; se usan diferentes motores de razonamiento y aprendizaje para construir y aplicar el conocimiento de las condiciones y respuestas aprendidas.
 - d) Base de datos de políticas; la base de datos de políticas puede ser definida y actualizada por organismos reguladores locales o globales. La base de datos puede incluir el estado de las bandas del espectro de radio local y los canales desocupados.
 - e) Sensores; proporcionan la información recopilada al motor cognitivo.
 - f) Algoritmos de optimización; los dispositivos cognitivos emplean diferentes algoritmos y tecnologías para construir y adaptar formas de onda de radio. Los sensores recopilan información del entorno de radio que alimenta a la unidad de RC que es responsable de optimizar y seleccionar la frecuencia adecuada, el enrutamiento, la potencia de transmisión y los parámetros de tasa de error.
 - g) Motor cognitivo; este módulo admite diferentes algoritmos de predicción y esquemas de asignación de recursos de radio.

2.1.13 FADING O DESVANECIMIENTO

Lei Zhang (2016) indica que el fading describe las fluctuaciones rápidas en las fases, amplitudes o retardos de una señal de radio en una corta distancia o tiempo. Además el desvanecimiento es producido por la interferencia entre dos o más versiones de la señal que llegan al receptor en momentos ligeramente deferentes.

Los factores que pueden ser causales son:

- Propagación de multitrayecto.
- Velocidad del usuario móvil.
- Velocidad de los objetos alrededor del radio del canal.

Hay varios tipos de desvanecimiento que se producen en el canal cuando se transmite y recibe una señal, una de ellas la podemos observar en la Tabla N°2.

Característica	Tipo de desvanecimiento	
Entorno o canal	Gran escala	Pequeña escala
Duración / Doppler Spread	Lento	Rápido
Profundidad	Profundo	Muy profundo
Espectro	Plano	Selectivo
Causa	Factor K	Multitrayecto
Distribución	Gaussiano	Rayleigh / Rice
Frecuencia	Continuado	Puntual

Tabla N°2: Clasificación de los desvanecimientos del canal

Fuente: Basado en J. Vega (2014)

Para lo que continúa de la tesis se ha dividido la clasificación de la tabla N°2 de acuerdo al tipo de entorno a fin de estar alineados al tema central.

2.2 PÉRDIDA DE TRAYECTORIA A GRAN ESCALA

El desvanecimiento a gran escala se caracterizan por lo siguiente:

- Comprende el promedio de cambios que sufre la señal cuando la distancia entre el transmisor al receptor varía grandemente.
- Este tipo de pérdida está en función de la distancia y el sombreado de objetos grandes como edificios y colinas.
- Ocurre cuando el móvil se mueve a una distancia del orden del tamaño de la celda, típicamente es independiente de la frecuencia y es más relevante para cuestiones tales como la planificación del sitio celular.

Los modelos de propagación a gran escala revela el comportamiento promedio de la señal en distancias mucho mayores a sus longitudes de onda.

Entre los factores que influyen en las pérdidas de trayectoria a gran escala, se encuentran los mencionados a continuación.

2.2.1 PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN EN ESPACIO LIBRE

A. Tahat, Y. Alqudah, (2011) indican que la mayor potencia de la señal de radio se pierde en el aire, incluso en el vacío la señal pierde la energía en direcciones diferentes a la que puede capturar la antena receptora (de acuerdo con los principios de Huygens).

$$FSL(dB) = 20\text{Log}d + 20\text{Log}f + K \quad \dots (4)$$

Donde:

d = distancia

f = frecuencia

K = constante que depende de las unidades usadas en d y f .

Nótese que esto no involucra características relacionadas con el con el aire, la niebla, la lluvia o relacionados.

2.2.2 DISIPACIÓN DE POTENCIA DE TRANSMISOR

El canal de radio inalámbrico presenta un desafío severo como medio para una comunicación confiable de alta velocidad y estos desafíos cambian con el tiempo de forma impredecible debido al movimiento del usuario. En la figura 2.13 se ilustra la relación entre la potencia recibida y transmitida en dB frente a la distancia logarítmica para los efectos combinados de pérdida de trayecto, sombreado y multitrayecto.

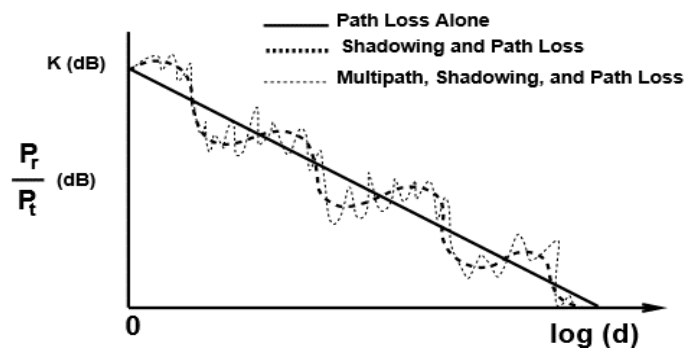


Figura 2.13: Path Loss, Shadowing y Multipath Vs Distancia

Fuente: Andrea Goldsmith (2004)

2.2.3 PÉRDIDAS POR SOMBRA O SHADOWING

El sombreado es causado por obstáculos entre el transmisor y el receptor que absorben energía. Cabe mencionar que es posible la recepción cuando no hay visión directa pero la señal se bloquea cuando el obstáculo absorbe toda la potencia. Se observa un ejemplo en la figura 2.14. Además, la variación debida a la pérdida de trayectoria se produce en distancias muy grandes (100-1000 metros), mientras que la variación debida al sombreado ocurre a distancias proporcionales a la longitud del objeto que obstruye (10-100 metros en entornos exteriores y menos en entornos interiores), estas variaciones se denominan a veces efectos de propagación a pequeña escala o desvanecimiento por trayectos múltiples (A. Goldsmith, 2004).

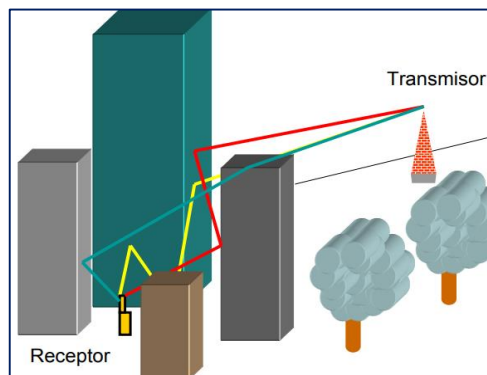


Figura 2.14: Efecto de los obstáculos

Fuente: Elaboración propia

2.2.4 EFECTOS ATMOSFÉRICOS

Durante la propagación se producen atenuaciones debidas a la temperatura, a la absorción de agua, oxígeno y dispersión causada por hidrometeoros como la lluvia, la nieve, el granizo o la niebla y los efectos son importantes en el caso de sistemas que operan a frecuencias milimétricas. En la figura 2.15 se ilustra el exceso de atenuación en el aire a través del espectro electromagnético hasta los 400GHz y muestra cómo las ondas electromagnéticas se atenúan dramáticamente por absorción atmosférica causada por la molécula de oxígeno a 60 GHz y la molécula de agua a 180 y 320 GHz.

En la UIT-R M.2376 (2015) se menciona que la temperatura y la humedad afectan en gran medida el exceso de atenuación real causada por la absorción, se menciona que la pérdida de gas atmosférico es de aproximadamente 0,10 dB / km a 28 GHz y aproximadamente 0,40 dB / km a frecuencias próximas a 70GHz. Para el caso de las celdas pequeñas, como las micro celdas urbanas ya que estas se desarrollarán dentro de los 200m, la atenuación del gas podría ser de poca importancia. En cuanto a los efectos por la lluvia, para radios de células pequeñas por debajo de 200 m, los efectos no parecen ser insuperables. Una portadora de 30 GHz verá una pérdida de menos de 1 dB sobre 200 m en una "lluvia intensa" (25 mm / h), mientras que una portadora de 60 GHz verá menos de 2 dB.

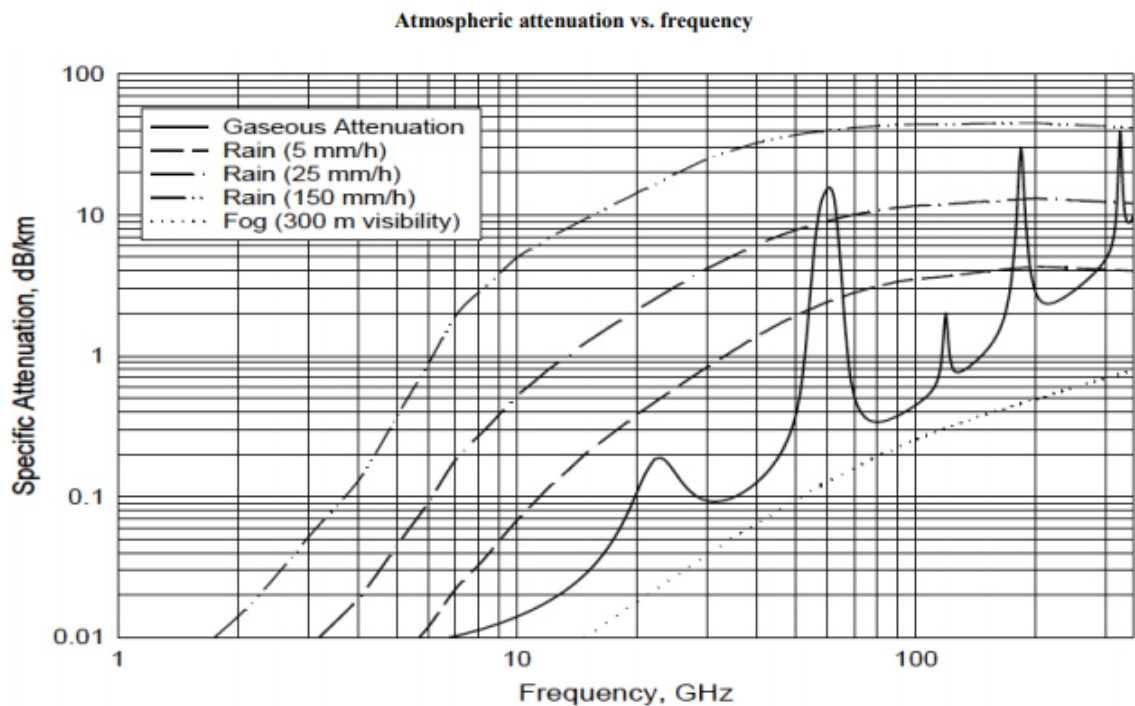


Figura 2.15: Atenuación debida a los gases atmosféricos Vs Frecuencia.

Fuente: Rec. UIT-R M.2376 (2015)

2.2.5 MECANISMOS BÁSICOS DE PROPAGACIÓN

La propagación en distancias menores a 1 km es afectada especialmente por las construcciones y los árboles, más que por la uniformidad del terreno (ya que lo más probable es que el terminal móvil esté en manos de un peatón o esté en un vehículo).

La Recomendación UIT-R P.1411-2 (2013) proporciona mecanismos básicos de propagación en trayectos cortos y ofrece métodos para estimar las pérdidas a lo largo de éste, entre los que se describen los siguientes: reflexión, refracción, difracción y dispersión.

2.2.5.1 REFLEXIÓN

Es el cambio de dirección de los rayos de luz que ocurre en un mismo medio después de incidir sobre la superficie de un medio distinto y se puede demostrar, aplicando el principio de Huygens, donde el frente de ondas reflejado forma un ángulo incidente \hat{i} que resulta ser igual al ángulo de reflexión \hat{r} como se muestra en la figura 2.16 (F. García, 2003).

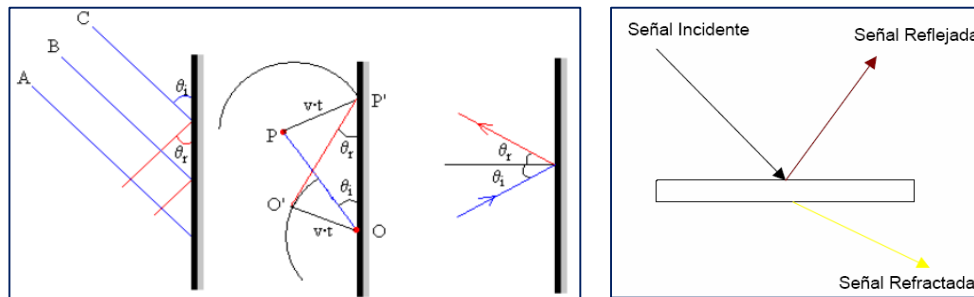


Figura 2.16: Reflexión de la onda

Fuente: F. García (2003)

Donde:

$\Theta\hat{i}$: ángulo de incidencia,

$\Theta\hat{r}$: ángulo de reflexión,

n_1, n_2 : índices de refracción

2.2.5.2 REFRACCIÓN

La refracción de la luz es el cambio de dirección de los rayos de luz, este fenómeno ocurre cuando el frente de ondas incidente entra en contacto con un segundo medio de distinto índice de refracción “n”, donde “n” es un número adimensional que caracteriza a un medio transparente y se define como la velocidad de la luz “c” o en el vacío entre la velocidad en el medio “v” ($n=c/v$)

El rayo incidente, el refractado y la normal a la superficie en el punto de incidencia están en el mismo plano y la relación entre ellos está definida por la Ley de Snell (J. Santos, 2018) así:

$$\text{Sen}(\Theta_i) \cdot n_1 = n_2 \cdot \text{Sen}(\Theta_r) \quad \dots (5)$$

2.2.5.3 DIFRACCIÓN

La difracción es un fenómeno que tiene lugar cuando las ondas que forman la luz atraviesan un orificio estrecho donde el frente de onda es frenado por el obstáculo, mientras que el resto continúa con la misma velocidad (P. Rodríguez, 3017).

2.2.5.4 DISPERSIÓN

“Es un fenómeno que ocurre cuando una o más ondas electromagnéticas atraviesan un material y estas se separan” (F. García, 2003).

2.3 PÉRDIDA DE TRAYECTORIA A PEQUEÑA ESCALA

El desvanecimiento a pequeña escala o solamente desvanecimiento se define como la rápida variación de la amplitud y fase de una señal de radio en un corto periodo y distancia en relación a su longitud de onda. Este tipo de pérdida depende de la frecuencia y es debido a la interferencia constructiva y destructiva de las múltiples rutas de señal entre el transmisor y el receptor.

2.3.1 PROPAGACIÓN POR MULTITRAYECTORIA

En el libro de A. Goldsmith (2004) se afirma que una característica importante de un canal de multitrayecto es la extensión del retardo de tiempo entre la llegada de la primera componente de señal recibida y la última componente de señal recibida asociada con un solo impulso transmitido. Si la extensión del retardo es pequeña en comparación con la inversa del ancho de banda de la señal, entonces hay poco tiempo de propagación en la señal recibida. Sin embargo, cuando la propagación del retardo es relativamente grande, hay una importante propagación en el tiempo de la señal recibida que puede conducir a una distorsión de señal.

Otra característica del canal multitrayecto es su naturaleza variable en el tiempo. Esta variación de tiempo se debe a que el transmisor o el receptor se están moviendo.

En resumen, a causa del fenómeno de reflexión es muy posible que el alcance de la señal transmitida hacia el receptor sea mediante múltiples rutas. Donde las señales provenientes de diferentes rutas llegarán ligeramente retardadas con respecto a la señal directa y ello provocará desvanecimiento de la señal recibida, por consiguiente, puede degradar la calidad del funcionamiento de los sistemas radioeléctricos. Los efectos varían conforme varía la ubicación y el tipo de antena utilizada, por ello la UIT-R F.1093-2 (2006) hace una serie de recomendaciones como medidas contra el desvanecimiento multitrayecto.

2.3.2 DESPLAZAMIENTO POR EFECTO DOPPLER

El efecto Doppler se produce cuando un usuario está en movimiento, donde su velocidad provoca un cambio en la frecuencia de la señal transmitida a lo largo de cada ruta de la señal. Señales que viajan por caminos diferentes pueden tener diferentes desplazamientos Doppler, correspondiente a las diferentes tasas de cambio de fase (M. Sierra, 2012).

2.3.3 INTERFERENCIA ENTRE SÍMBOLOS

La interferencia inter simbólica existe en cualquier tecnología que use símbolos para el transporte de información.

En un sistema ideal, los símbolos transmitidos llegan al receptor sin ninguna pérdida o interferencia como se muestra en la figura 2.17 (Leopedrini, 2014)

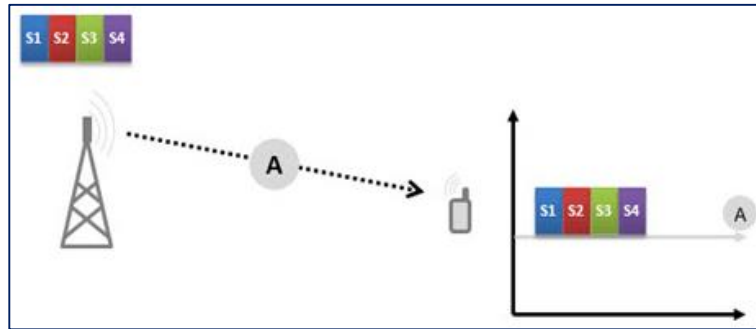


Figura 2.17: Recepción de símbolos en un sistema ideal

Fuente: Leopedrini (2014)

Lo que sucede en la práctica es que la misma señal llega a través de múltiples rutas (Multipath) y en consecuencia con diferentes retardos (Delay Spread). En el receptor, todos estos componentes se suman y el resultado práctico es que recibimos múltiples símbolos simultáneamente, esta es la interferencia entre símbolos (ISI) donde un factor determinante para el ISI es la duración del símbolo, como se muestra en la figura 2.18

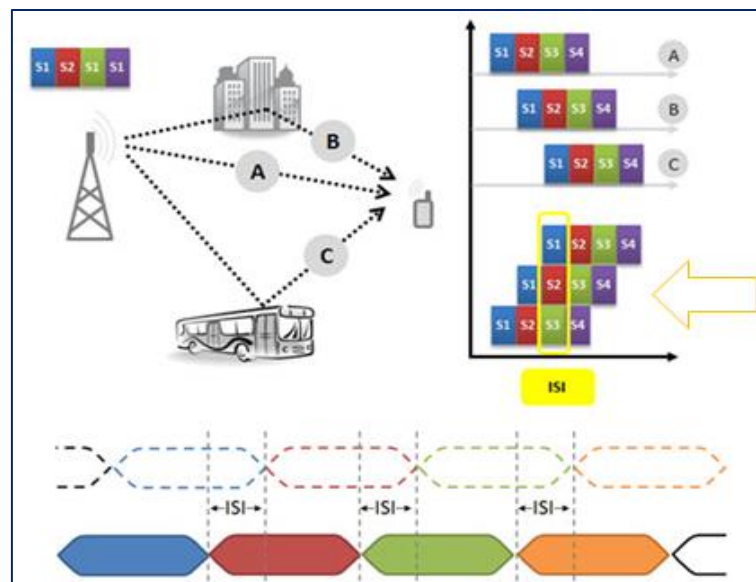


Figura 2.18: Interferencia Inter simbólica

Fuente: Leopedrini (2014)

2.4 MODELOS DE CANAL

Los modelos de canal son una alternativa eficiente para determinar la atenuación que sufrirá la señal, dar soluciones a los problemas que surgen en cada escenario de estudio y predecir las pérdidas de trayecto en un entorno específico. En este sentido, mientras más exactos sean los cálculos, menor será el error que se cometa a la hora de realizar las simulaciones para la posterior instalación del sistema.

Los modelos de canal se utilizan en el diseño y la pre-evaluación de los sistemas inalámbricos y como técnica para limitar o disminuir los impactos adversos del medio; además es esencial para estimar las localizaciones óptimas de las estaciones base, a fin de conseguir altas tasas de transmisión, mayor área de cobertura y precisión. Para ello, es esencial el conocimiento de las características de propagación radioeléctrica dado que su uso depende de las características del escenario, banda de frecuencia, movilidad de usuarios y área de cobertura. Se clasifica los modelos de canal a continuación (A. Hes-Shafi, 2009):

2.4.1 De acuerdo con el origen de datos

- a) Modelo estocástico: denominado así por tratar una serie de variables aleatorias que varían con el tiempo, causando grandes imprecisiones en sus resultados y donde cada una de las variables aleatorias del proceso tiene su propia función de distribución de probabilidad y pueden o no, estar correlacionadas entre ellas.

El enfoque estocástico basado en la geometría caracteriza al canal como una serie de rayos probabilísticos con diferente retardo y dispersión angular representativos de un entorno particular de propagación de múltiples rutas. Las estadísticas espaciales y temporales se recopilan en una campaña de medición para una frecuencia determinada en un entorno típico del despliegue deseado.

- b) Modelo determinístico: En este modelo los resultados de la simulación no tienen ninguna distribución de probabilidad y son valores que sólo dependen de las condiciones de simulación, los datos a analizar se conocen con certeza. Están basados en la teoría de la propagación de ondas electromagnéticas y aunque no requieren extensas campañas de medidas necesitan conocer en mayor detalle el entorno.

- c) **Modelo empírico:** Está basado en la caracterización estadística de la señal, son fáciles de implementar y son menos sensibles a la geometría del entorno. Sin embargo, estos modelos requieren de extensas campañas de medida que permitan una completa caracterización del canal.

2.4.2 Según el tipo de entorno

Los modelos de canal pueden ser de gran y pequeña escala.

2.4.3 De acuerdo con el ambiente de propagación

Puede ser en interiores o exteriores.

2.4.4 De acuerdo con el tamaño del área de cobertura

Los resultados de un modelo de canal dependen del tamaño del área de cobertura en la que se realizan los cálculos, dicho de otro modo, la precisión no es la misma si se trata de un área de estudio de miles de kilómetros cuadrados que de una docena de metros cuadrados. Además cabe mencionar que el tamaño de una celda depende de la cobertura que es capaz de proporcionar una estación base como se observa en la figura 2.19 y se detalla a continuación:

- a. **Celdas globales:** el radio se encuentra arriba de los 100km y suelen dar cobertura a zonas de difícil acceso.
- b. **Hiperceldas:** tiene un radio entre los 30 y 100Km y son característicos en zona rural.
- c. **Macrocelas:** tiene un radio entre 1,5 y 30Km y son diseñadas para vías de comunicación y en ciudades pequeñas.
- d. **Microcelas:** tiene un radio entre los 0,1 y 1,5Km. Son típicas en grandes ciudades y están diseñadas para disminuir el traspaso de comunicación entre celdas contiguas o también llamado handover.
- e. **Picoceldas:** tiene un radio menor a los 100m y son comunes en lugares con gran concentración de personas (oficinas, centros comerciales, estadios).
- f. **Femtoceldas:** tiene un radio de decenas de metros y son diseñadas para hogares y en interiores.

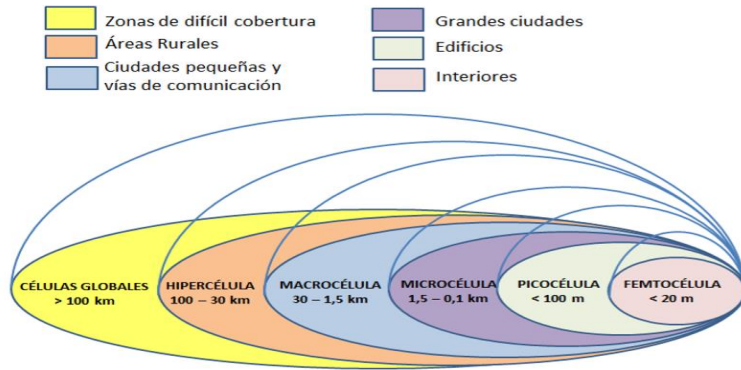


Figura 2.19: Clasificación de las celdas

Fuente: G. Espinoza (2016)

Es importante mencionar que un modelo convencional de canal de radio está caracterizado en dos dominios: frecuencia y tiempo y cuyo cálculo se muestra de manera resumida en la figura 2.20

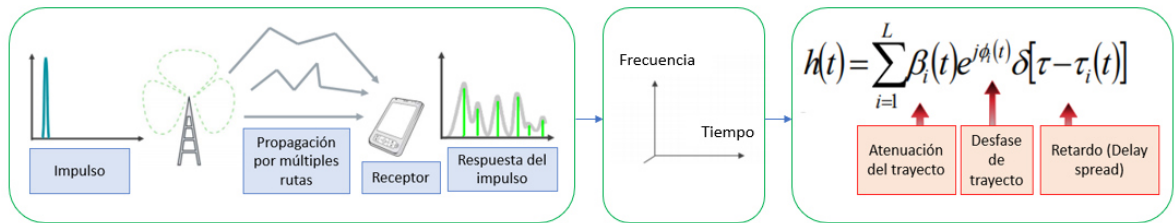


Figura 2.20: Esquema de un modelo de canal convencional

Fuente: Elaboración propia basado en Keysight Technologies (2018)

Por otro lado, la ampliación al modelo de canal MIMO para 5G está caracterizado por: el tiempo, frecuencia, espacio y polarización y cuyo cálculo se muestra de manera resumida en la figura 2.21

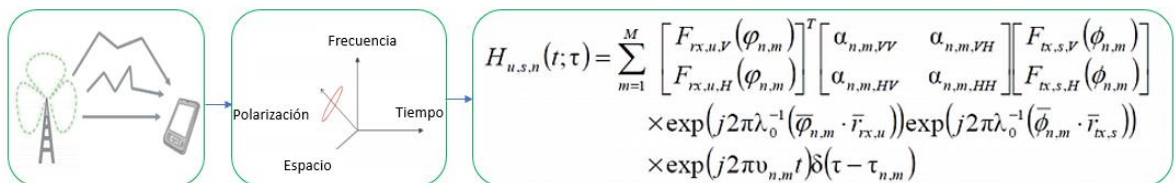


Figura 2.21: Esquema de un modelo de canal MIMO

Fuente: Elaboración propia basado en Keysight Technologies (2018)

2.5 ESCENARIOS Y REQUISITOS PARA EL MODELADO

Se señalan dos requisitos como determinantes en los modelos de canal. El primer requisito considera los escenarios desde el entorno y la perspectiva del usuario, mientras que el segundo se refiere al componente de tecnología necesario para proporcionar los servicios del usuario final reutilizados (A Osseiran, J. Monserrat y P. Marsch, 2016)

En la tabla N°3 se resumen los requisitos generales de escenario, espectro, antena, sistema para el modelado de canales:

Categoría	Requisitos
Escenario	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Amplia gama de entornos de propagación (interiores y exteriores)
Espectro	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rango de frecuencia de 1 GHz hasta 100 GHz ▪ Además de las frecuencias inferiores a 6 Ghz, se han priorizado las siguientes bandas superiores a 6 Ghz: 10 Ghz, 18-19 Ghz, 28-29 Ghz, 32-33 Ghz, 36 Ghz, 41-52 Ghz, 56-76 Ghz y 81-86 Ghz, desde donde las bandas de alta prioridad son 32-33 Ghz, 43 Ghz, 46-50 Ghz, 56-76 Ghz y 81-86 Ghz. ▪ Soporte de anchos de banda del sistema superiores a 500Mhz (alta resolución de retardo)
Antena	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Soporte de antenas de gran tamaño (ondas no planas (esféricas) y alta resolución angular) ▪ Modelado de matrices grandes más allá del intervalo de coherencia.
Sistema	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Consistencia espacial de los parámetros de gran escala (Large Scale) (LaS) para celdas pequeñas, celdas móviles, D2D, M2M, V2V, MU-MIMO, etc. ▪ Movilidad de dos extremos ▪ Entorno móvil
General	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Realismo físico (el modelo debe ser validado por medio de una cantidad suficiente de datos de medición). ▪ Complejidad razonable para una aplicación dada.

Tabla N°3: Requisitos para el modelado de canales 5G

Fuente: Adaptado de A Osseiran, J. Monserrat y P. Marsch (2016)

2.6 ENTORNOS DE PROPAGACIÓN

Se describen 5 tipos de escenarios los cuales fueron recopilados del informe TR 38.901 del 3GPP por incluir de forma más completa los tipos de escenarios de propagación radioeléctrica, estos son: Micro urbano, Macro urbano, indoor, rural y D2D / V2V como se muestra en la tabla N°4.

Caso	Dominio	Descripción y degradaciones importantes en la propagación
N°1	Micro urbano (UMi), (full outdoor o la combinación de indoor y outdoor)	<ul style="list-style-type: none"> La estación base se monta debajo de los niveles de los edificios circundantes. Esta área está diseñada para capturar escenarios de la vida real, como una plaza de una ciudad o estación. El ancho del área abierta típica está varía entre los 50 a 100m <p>Ejemplo: Un escenario en el que la altura desde el nivel del piso a la antena transmisora es 10m, la altura desde el nivel del piso a la antena receptora está entre 1.5-2.5 m y la distancia entre la antena transmisora y receptora sea de 200m.</p>
N°2	Macro urbano (UMa), (full outdoor o la combinación de indoor y outdoor)	<ul style="list-style-type: none"> La estación base se montan por encima de los niveles de la azotea de edificios circundantes. <p>Ejemplo: Un escenario en el que la altura desde el nivel del piso a la antena transmisora es 25m, la altura desde el nivel del piso a la antena receptora está entre 1.5-2.5 m y la distancia entre la antena transmisora y receptora sea de 500m.</p>

N°3	Indoor	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El entorno de oficina típico se compone de áreas abiertas pequeñas, oficinas amuralladas, pasillos, etc. ▪ Las estaciones base (BS) son colocadas a una altura de 2-3 m, ya sea en los techos o en las paredes. ▪ Los centros comerciales suelen tener una altura de 1 a 5 pisos y pueden incluir un área abierta compartida por varios pisos. <p>Ejemplo: Un escenario en el que la altura desde el nivel del piso a la antena transmisora está entre 2-3m, la altura desde el nivel del piso a la antena receptora está entre 1.5m en un área de 500m².</p>
N°4	Rural	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tráfico motorizado ocasionalmente elevado.
N°5	D2D V2V	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Acceso de dispositivo a dispositivo en áreas abiertas y escenarios interiores. V2V es un caso especial donde los dispositivos son móviles.

Tabla N°4: Escenarios de propagación según 3GPP

Fuente: Adaptado de TR 38.901 versión 14

Se describen 2 modos de usuario según se trate de personas o de vehículos como se detalla en la tabla N°5

Entorno	Velocidad de los usuarios peatonales (m/s)	Velocidad de los usuarios en vehículos
Urbano de construcción alta	1,5	Velocidades típicas del centro de la ciudad del orden de 50 km/h (14 m/s)
Urbano/suburbano de construcción baja	1,5	Unos 50 km/h (14 m/s); en autopistas hasta 100 km/h (28 m/s)
Residencial	1,5	Unos 40 km/h (11 m/s)
Rural	1,5	80-100 km/h (22-28 m/s)

Tabla N°5: Velocidad típica del móvil de acuerdo al tipo de escenario.

Fuente: UIT-R P.1411-2

En cuanto al tipo de células se describen 3 celdas de propagación de exteriores en trayecto corto las cuales guardan relación entre la altura de la antena y los edificios circundantes, estos son: pequeña macrocelda, microcelda y picocelda como se detalla en la tabla N°6

Caso	Tipo de celda	Radio de la célula	Posición típica de la antena de la estación de base
N°1	Pequeña macrocelda	0,5 a 3 km	Exteriores; montada por encima del nivel promedio de los techos.
N°2	Microcelda	100 a 500 m	Exteriores; montada por debajo del nivel promedio de los techos
N°3	Picocelda	Hasta 100 m	Interiores o exteriores (montada por debajo del nivel máximo de los techos)

Tabla N°6: Tipos de células típicas en la propagación en exteriores de trayecto corto.

Fuente: UIT-R P.1411-2

En la recomendación UIT-R P.1411-2, se pueden considerar tres niveles para la posición de las estaciones en entornos urbanos o suburbanos:

- a) Arriba de los techos como: L1
- b) Debajo de los techos pero por encima del nivel de la cabeza, como: L2
- c) al mismo nivel o por debajo del nivel de la cabeza: L3

Se pueden considerar seis tipos distintos de enlace dependiendo de la localización de las estaciones base, estas pueden ser: con línea de vista como AC o sin línea de vista como AB como se muestra en la figura 2.22

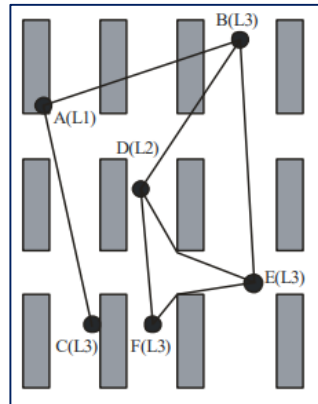


Figura 2.22: Situaciones típicas de propagación en zonas urbanas

Fuente: UIT-R P.1411

2.7 PROPUESTAS DE MODELOS DE PÉRDIDAS DE PROGACIÓN PARA 5G

De la recomendación de la ITU (2015) se extrae: “El tipo de modelo depende de la gama de frecuencias. Han de aplicarse modelos distintos para la propagación en ondas decimétricas y milimétricas. En la gama de frecuencias decimétricas, se consideran situaciones LoS y NLoS. En el caso de ondas milimétricas, sólo se considera la LoS. En esta última gama se ha de considerar también la atenuación por el oxígeno e hidrometeoros”

Debido a la variación de las características de propagación en bandas por encima de 6 GHz, es apropiado investigar las singularidades de la propagación en estas frecuencia de manera independiente. Como se mencionó en el capítulo 1, esta investigación profundiza en la propagación para un entorno macro urbano denso (UMa) en las bandas 28GHz y 73GHz con y sin línea de vista. Luego, la cobertura puede ser analizada desde la perspectiva del Link Budget con la atenuación de la potencia de la señal en el aire.

A continuación se explican las propuestas de los tres modelos a analizar en esta investigación (IMT¹³, 3GPP y METIS)

¹³ Los trabajos de la IMT avanzadas son impulsados por el grupo de 5D del ITU y se evidencian en los informes UIT-R. como se explica en la página 28. Por ello más adelante diremos ITU o IMT para referirnos a lo mismo.

2.7.1 MODELO DE PROPAGACIÓN ITU

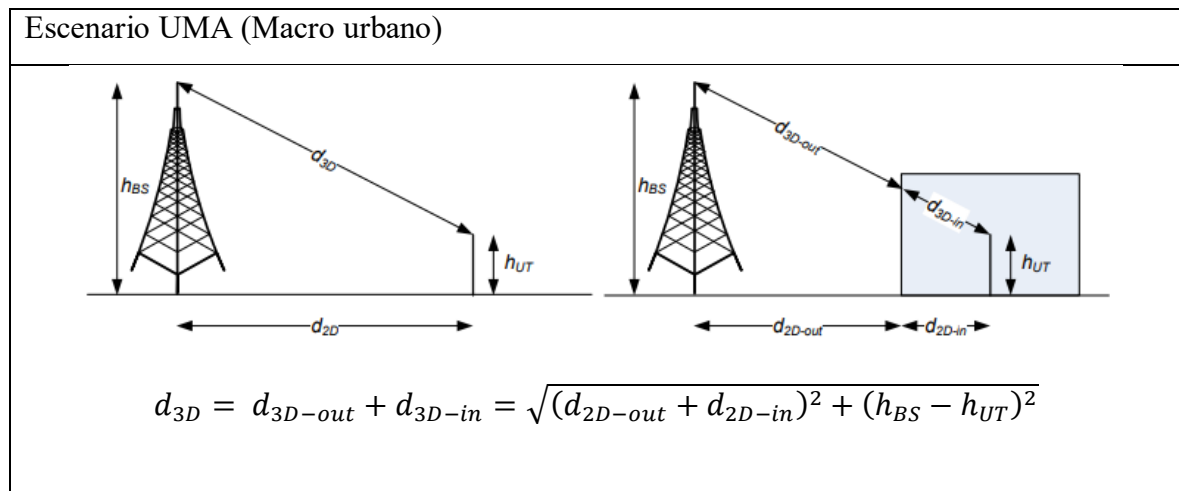
El modelo de propagación ITU se basa en la interpolación y extrapolación de curvas de intensidad de campo resultado de medidas empíricas hechas en New York, Manhattan, al aire libre como el que se muestra en la figura 2.23 donde se encuentran edificios de hasta 70m de altura con la antena emisora montada en el punto O y la receptora en la marca amarilla, como se describe en la publicación “An Outdoor-to-Indoor Propagation Scenario at 28 GHz” de C. Larsson, F. Harrysson, B. Olsson, J. Berg (2014)



Figura 2.23: Escenario de campaña de medición de la ITU

Fuente: C. Larsson, F. Harrysson, B. Olsson, J. Berg (2014)

En la Tabla N°7 extraída del documento oficial ITU-R M.2412-0 se describen las variables que utiliza este modelo, el cálculo de pérdida de propagación, shadow fading y la probabilidad de tener línea de vista para un entorno macrourbano.



Path loss y shadow fading para UMA en condiciones LOS (Con línea de vista)
$0.5GHz \leq f_c \leq 6GHz$ y $6GHz < f_c \leq 100GHz$ $PL_{UMA-LOS} = \begin{cases} PL_1 & 10m \leq d_{2D} \leq d'_{BP} \\ PL_2 & d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5km \end{cases}$ $PL_1 = 28.0 + 22 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c), \sigma_{SF} = 4_{dB}$ $PL_2 = 40 \log_{10}(d_{3D}) + 28.0$ $+ 20 \log_{10}(f_c) - 9 \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2), \sigma_{SF} = 4_{dB}$
Path loss y shadow fading para UMA en condiciones NLOS (Sin línea de vista)
$6GHz < f_c \leq 100GHz$ $PL_{UMA-NLOS} = \max(PL_{UMA-LOS}, PL'_{UMA-LOS})$, $10m \leq d_{2D} \leq 5km$ $PL'_{UMA-NLOS} = 13.54 + 39.08 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 0.6(h_{UT} - 1.5), \sigma_{SF}$ $= 6_{dB}$ Opcional: $PL = 32.4 + 20 \log_{10}(f_c) + 30 \log_{10}(d_{3D})$, $\sigma_{SF} = 7.8_{dB}$ $h_{BS} = 25m, 1.5m \leq h_{UT} \leq 22.5m$
Probabilidad LOS para UMA (Probabilidad de tener línea de vista)
$P_{LOS} =$ $\begin{cases} 1 & , d_{2D} \leq 18m \\ \left[\frac{18}{d_{2D}} + \exp\left(-\frac{d_{2D}}{63}\right) \left(1 - \frac{18}{d_{2D}}\right) \right] \left(1 + C'(h_{UT}) \frac{5}{4} \left(\frac{d_{2D}}{100}\right)^3 \exp\left(-\frac{d_{2D}}{150}\right)\right) & , 18m < d_{2D} \end{cases}$ Donde: $C'(h_{UT}) = \begin{cases} 0 & , h_{UT} \leq 13m \\ \left(\frac{h_{UT}-13}{10}\right)^{1.5} & , 13m < h_{UT} \leq 23m \end{cases}$

Tabla N°7: Cálculo de pérdida de propagación, shadow fading y probabilidad de tener línea de vista para un entorno Macrourbano para el modelo ITU.

Fuente: Extraído del documento oficial ITU-R (M.2412-0 , 2017)

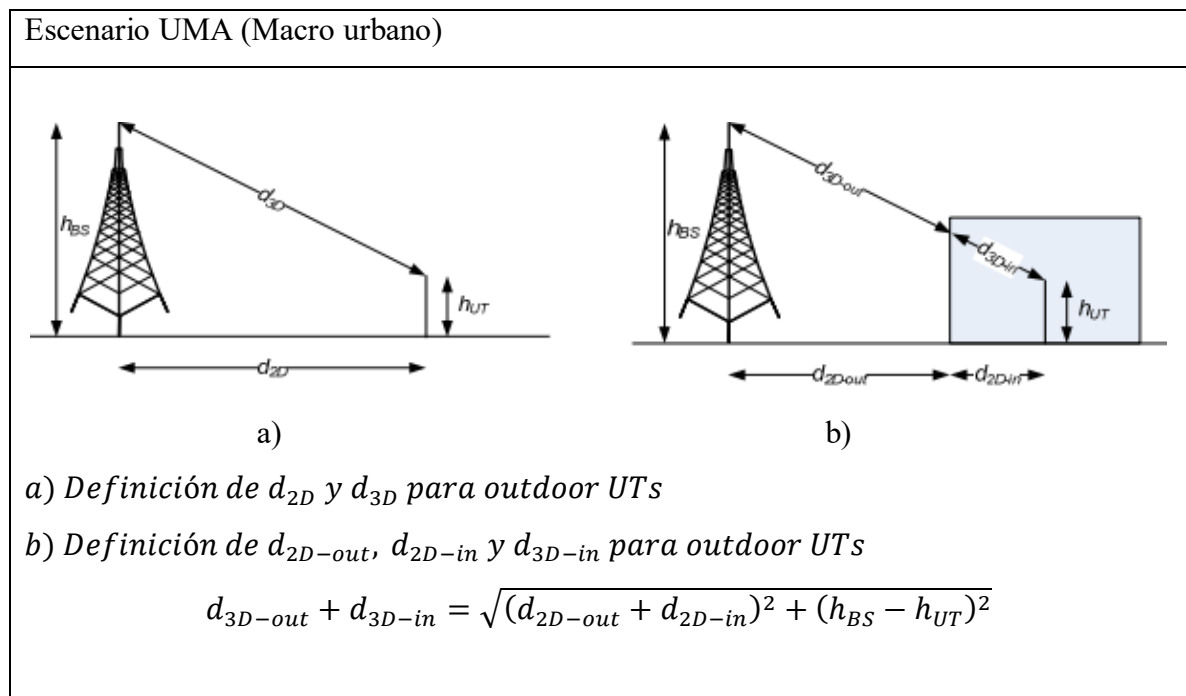
2.7.2 MODELO DE PROPAGACIÓN 3GPP-3D

Es un modelo empírico probabilístico y también es un modelo determinista porque se basa en el análisis de las leyes electromagnéticas para la descripción de la onda en un cierto punto en el medio.

Este modelo realizó campañas de mediciones en Austin y la Universidad de Nueva York para un escenario macro urbano cuyas alturas de edificios se distribuyen típicamente entre 4 y 8 pisos, donde se ubica la antena emisora a 25m del piso.

Este modelo de canal 3D sigue el marco de WINNERII / WINNER + y también introduce algunos parámetros de altura y elevación dependiendo de la distancia entre el emisor y receptor. El nuevo modelo admite comparaciones en bandas de frecuencia en el rango de 0,5 a 100GHz (TR 38.900 versión 14.2.0, 2017).

Las definiciones de distancia, los cálculos de pérdida de propagación, shadown fading y el cálculo de la probabilidad de tener línea de vista se resume en la Tabla N°8 recopilada del documento oficial del 3GPP (TR 38.900 versión 14.2.0, 2017)



Pathloss (dB), f_c (GHz), d (metros) en condiciones LOS	Shadow fading (dB)	Aplicabilidad
$PL_{UMA-LOS} = \begin{cases} PL_1 & 10m \leq d_{2D} \leq d'_{BP} \\ PL_2 & d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5km \end{cases}$ $PL_1 = 32.4 + 20 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 32.4 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 10 \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$	$\sigma_{SF} = 4_{dB}$	$1.5m \leq h_{UT} \leq 22.5m$ $h_{BS} = 25m,$
Pathloss (dB), f_c (GHz), d (metros) en condiciones NLOS	Shadow fading (dB)	Aplicabilidad
$PL_{UMA-NLOS} = \max(PL_{UMA-LOS}, PL'_{UMA-LOS})$ Para $10m \leq d_{2D} \leq 5km$ $PL'_{UMA-NLOS} = 13.54 + 39.08 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 0.6 (h_{UT} - 1.5)$	$\sigma_{SF} = 6_{dB}$	$1.5m \leq h_{UT} \leq 22.5m$ $h_{BS} = 25m,$
Opcional: $PL = 32.4 + 20 \log_{10}(f_c) + 30 \log_{10}(d_{3D})$	$\sigma_{SF} = 7.8_{dB}$	
Probabilidad LOS para escenario UMA (Probabilidad de tener línea de vista)		
$P_{LOS} = \begin{cases} 1 & , d_{2D} \leq 18m \\ \left[\frac{18}{d_{2D}} + \exp\left(-\frac{d_{2D}}{63}\right) \left(1 - \frac{18}{d_{2D}}\right) \right] \left(1 + C'(h_{UT}) \frac{5}{4} \left(\frac{d_{2D}}{100}\right)^3 \exp\left(-\frac{d_{2D}}{150}\right) \right) & , 18m < d_{2D} \end{cases}$ Donde: $C'(h_{UT}) = \begin{cases} 0 & , h_{UT} \leq 13m \\ \left(\frac{h_{UT}-13}{10}\right)^{1.5} & , 13m < h_{UT} \leq 23m \end{cases}$		

Tabla N°8: Cálculo de pérdida de propagación, shadow fading y probabilidad de tener línea de vista en un entorno Macrourbano para el modelo 3GPP.

Fuente: Extraído del documento oficial del 3GPP (TR 38.900 versión 14.2.0, 2017)

2.7.3 MODELO DE PROPAGACIÓN METIS

Mobile and Wireless Communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society
Es el proyecto emblemático 5G de la Unión Europea y está llevando a cabo investigaciones sobre los componentes de la tecnología 5G.

El objetivo general del grupo METIS es establecer las bases del sistema móvil e inalámbrico para 5G para proporcionar habilitadores técnicos que cumplan con los requisitos previstos. La línea de trabajo del proyecto METIS puede dividirse en tres fases: 1) la fase exploratoria consiste en sentar las bases del sistema 5G, 2) la fase de optimización y 3) la fase de implementación que consiste en ensayos pre-comerciales como se muestra en la figura 2.24.

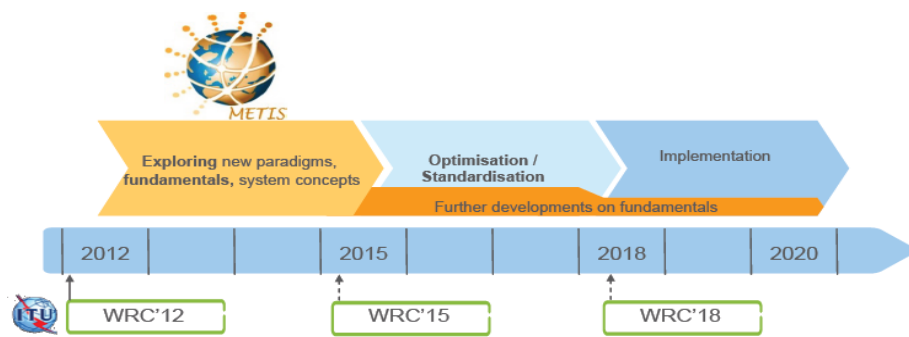


Figura 2.24: Timeline de METIS

Fuente: A. Osseiran, et. al (2014)

Es el modelo predictivo más reciente y corresponde a un modelo estocástico, determinístico porque modela el canal a partir de un conjunto de variables aleatorias tales como el ángulo de elevación, azimut, altura, distancia entre la estación base y el terminal móvil, etc.

Además, este grupo considera doce casos de prueba que incluye el modelo ambiental, consideraciones de despliegue, modelo de propagación, modelo de tráfico, modelo de movilidad, línea de base tecnológica e indicadores clave de rendimiento y sus características se resumen en la figura 2.25.



Figura 2.25: Características del escenarios de propagación definidos en METIS

Fuente: Journey Towards 5G, Ericsson (2014)

La pérdida de trayectoria, el sombreado y otras características de propagación se determinan en función del diseño del mapa y de una distribución aleatoria de objetos que representan personas, vehículos y árboles, etc. Además, este modelo utiliza trazado de rayos según la geometría tridimensional del escenario de propagación, y el Deliverable D6.1 (2013) recoge los resultados de los procedimientos de calibración, directrices para la simulación.

El modelo que presenta METIS se basa en mapas proporcionando así propiedades de canales espaciales precisas y realistas D2D y V2V adecuadas para aplicaciones como MIMO masivo y formación avanzada de haces.

A. Osseiran, J Monserrant (2016) en el libro 5G Mobile and Wireless Communications technology comentan que un requisito previo para cualquier modelo basado en trazado de rayos es la descripción geométrica del entorno donde el nivel de detalles del mapa no necesita ser alto, solo se deben definir muros de construcción y posiblemente otras estructuras fijas. El entorno que consideró METIS en su campaña de medición fue la ciudad de Madrid cuya geometría se muestra en la figura 2.26

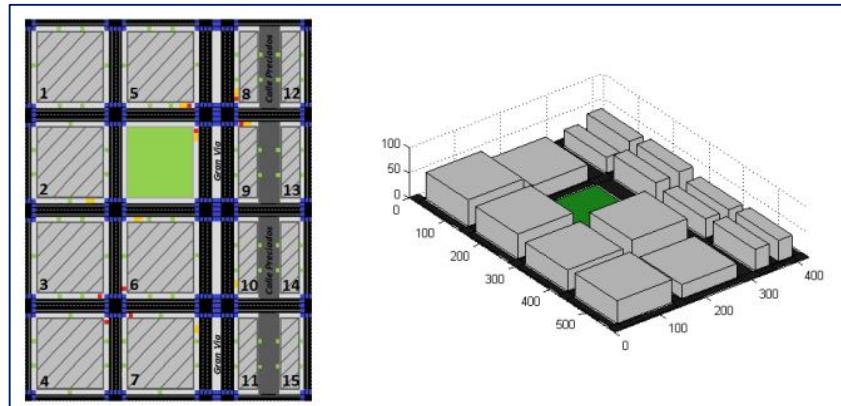


Figura 2.26: Geometría 3D de la construcción de la ciudad de Madrid.

Fuente: Deliverable D6.1 de METIS (2013)

En METIS-II (2016) uno de los objetivos clave es permitir que los conceptos 5G alcancen y convengan a los tomadores de decisiones de industrias no TIC, por lo tanto, es necesario tener ilustraciones fáciles de entender de los casos de uso 5G previstos y las soluciones técnicas propuestas, dirigidas a los no expertos. (MET16-D22, MET16-WP y MDB + 16). En ese sentido, METIS-II ha introducido una herramienta profesional de visualización 3D que permite al espectador interactuar con los escenarios habilitados para 5G para ello decidió introducir un nuevo enfoque de visualización y evaluación del rendimiento de las características y capacidades de la red de radio basada en una ingeniería de juegos seria utilizando una plataforma profesional de reproducción y juegos, UNITY 3D.

Este modelo considera un diagrama de bloques el cual se clasifica en 12 niveles: En un nivel superior, el procedimiento se divide en cuatro operaciones principales: creación del entorno, determinación de vías de propagación, determinación de matrices de canales de propagación para segmentos de trayecto y composición de la función de transferencia de canal de radio como se ilustra en la figura 2.27.

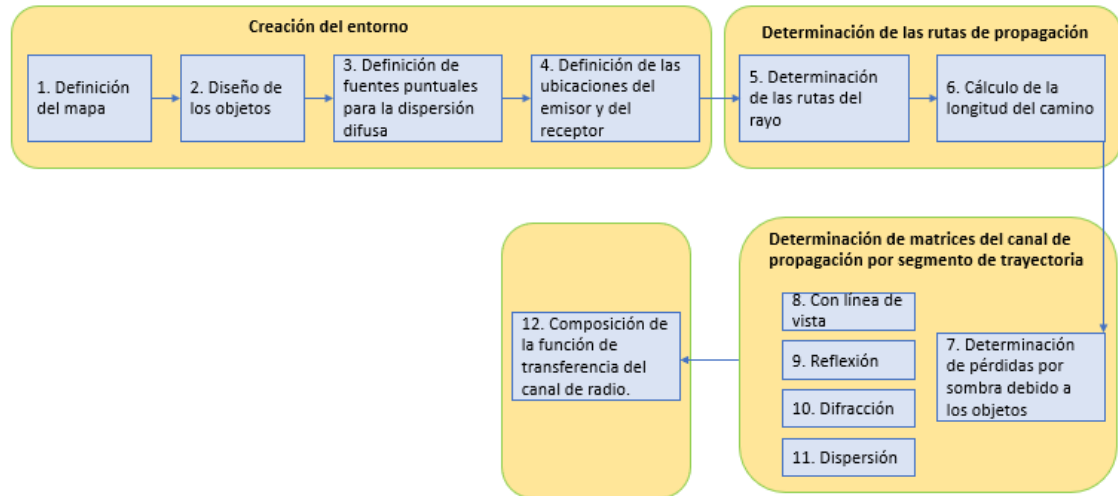


Figura 2.27: Diagrama de bloques del modelo basado en mapas

Fuente: Elaboración propia basado del libro 5G Mobile and Wireless Communications Technology de A. Osseiran, J. Monserrat y P. Marsh (2017)

En el Deliverable D6.1 (2013) se describe el cálculo de la pérdida de transmisión total en decibelios como la suma de la pérdida de espacio libre, la pérdida de difracción desde la azotea a la calle y la pérdida debido a la difracción de edificios en base a la figura 2.28 como se describe a continuación:

$$L(R) = \begin{cases} L_{sf} + L_{rts} + L_{msd} & \text{if } L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_{sf} & \text{if } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \end{cases} \quad \dots (6)$$

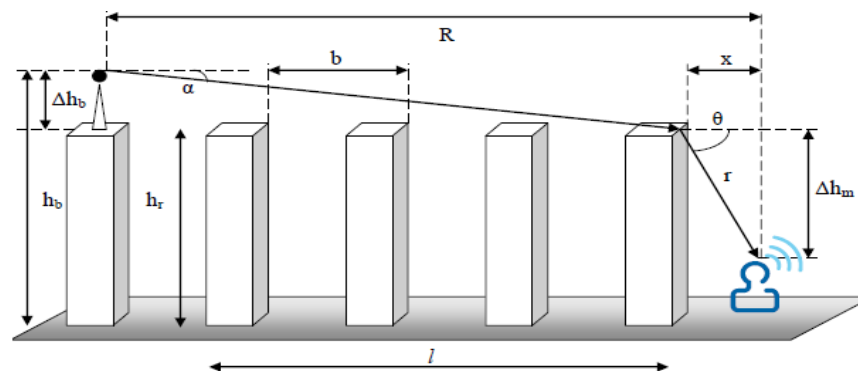


Figura 2.28: Escenario de propagación definido en METIS

Fuente: METIS (Deliverable D6.1, 2013)

Dada una separación R entre el móvil y la estación base, la pérdida de espacio libre viene

$$\text{dada por: } L_{fs} = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad \dots (7)$$

La difracción desde la azotea hasta el nivel de la calle donde está la estación móvil, está dada por:

$$L_{rts} = -20 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arctan \left(\text{sign}(\theta) \sqrt{\frac{\pi^3}{4\lambda}} r (1 - \cos\theta) \right) \right] \quad \dots (8)$$

Donde de acuerdo a la figura:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{|\Delta h_m|}{x} \right) \quad \dots (9)$$

$$r = \sqrt{(\Delta h_m)^2 + x^2} \quad \dots (10)$$

$$d_s = \frac{\lambda}{\Delta(h_b)^2} \quad \dots (11)$$

Si: $l > d_s$

$$L_{mds} = L_{bsh} + k_a + k_b + k_d \log_{10} \left(\frac{R}{1000} \right) + k_f \log_{10}(f) - 9 \log_{10}(b) \quad \dots (12)$$

$$\text{Donde: } L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log_{10}(1 + \Delta h_b) & \text{for } h_b > h_r \\ 0 & \text{for } h_b \leq h_r \end{cases} \quad \dots (13)$$

Es un término de pérdida que depende de la altura de la estación base:

$$k_a = \begin{cases} 54 & \text{for } h_b > h_r \\ 54 - 0.8 \Delta h_b & \text{for } h_b \leq h_r \text{ and } R \geq 500 \\ 54 - 1.6 \Delta h_b R / 1000 & \text{for } h_b \leq h_r \text{ and } R < 500 \end{cases} \quad \dots (14)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \text{for } h_b > h_r \\ 18 - 15 \frac{\Delta h_b}{h_r} & \text{for } h_b \leq h_r \end{cases} \quad \dots (15)$$

Además:

$$k_f = 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad \dots (16)$$

para ciudades medianas y centros suburbanos con densidad media de árboles, mientras que

$$k_f = 15 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad \dots (17)$$

es para centros metropolitanos. Obsérvese que la frecuencia está expresada en MHz en estas ecuaciones.

Por otra parte, si $l \leq d_s$

Debe hacerse una distinción adicional en función de las alturas relativas de la estación base y las azoteas:

$$L_{msd} = -10 \cdot \log_{10}(Q_M^2) \quad \dots (18)$$

Donde:

$$Q_M = \begin{cases} 2.35 \left(\frac{\Delta h_b}{R} \sqrt{\frac{b}{\lambda}} \right)^{0.9} & \text{for } h_b \leq h_r \\ \frac{b}{R} & \text{for } h_b \approx h_r \\ \frac{b}{2\pi R} \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}} \left(\frac{1}{\vartheta} - \frac{1}{2\pi + \vartheta} \right) & \text{for } h_b < h_r \end{cases} \quad \dots (19)$$

$$\vartheta = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta h_b}{b} \right) \quad \dots (20)$$

$$\rho = \sqrt{\Delta h_b^2 + b^2} \quad \dots (21)$$

2.8 UNITY

Unity es un motor de videojuego en 3D y 2D multiplataforma creado por Unity Technologies que permite crear entornos simulados realistas. Está disponible como plataforma de desarrollo para Microsoft Windows, OS X y Linux y el motor gráfico utiliza plataformas como OpenGL, Direct3D, OpenGL ES e interfaces propietarias (Wii). En la programación se puede usar UnityScript, C# o Boo.

Las aplicaciones del mercado de UNITY 3D no se limitan a los juegos también simula entornos detallados con datos complejos e interacciones sofisticadas limitado solo por la imaginación de las mentes creativas detrás de cada proyecto como se puede observar en el siguiente video (<https://www.youtube.com/watch?v=CLPBF1A1DAw>) y en la figura 2.29 donde la arquitectura, el diseño interior e industrial, la gestión, el análisis de datos, la capacitación y la educación son solo algunas de las áreas en las que se utiliza y aplica UNITY 3D en la actualidad y eso es lo que hace de la plataforma una herramienta perfecta para las tareas de visualización y evaluación dentro del proyecto METIS-II (2016).

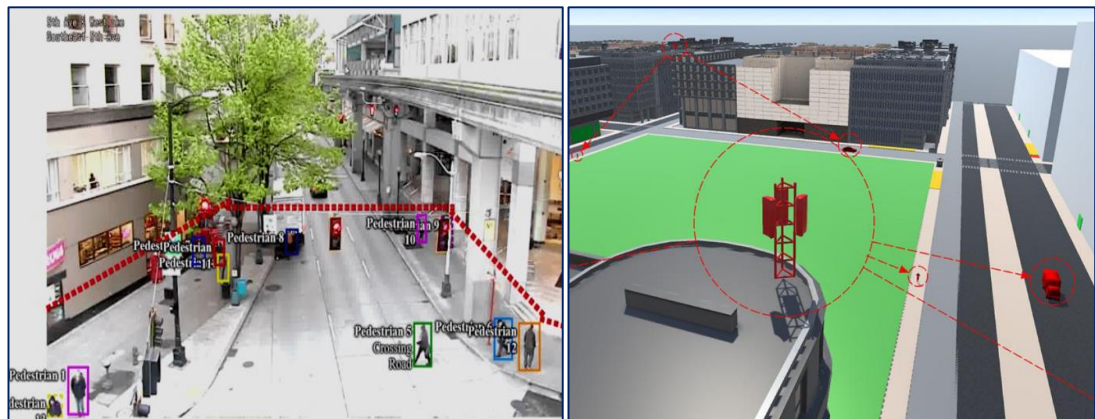


Figura 2.29: Casos de uso de Unity

Fuente: Unity Technologies (2018) y METIS (2016)

El papel de la herramienta de ingeniería de juegos UNITY 3D en METIS-II es múltiple, por ejemplo:

- a) Simplifica la definición, implementación y parametrización de casos de uso en escenarios 3D complejos siguiendo un enfoque de “lo que ves es lo que obtienes”
- b) Permite simular y evaluar muchas de las soluciones desarrolladas mediante la incorporación de modelos de algoritmos y características de la red de radio.
- c) Simplifica la visualización de los resultados utilizando los motores de juego y permite experimentar el rendimiento alcanzable de un usuario, así como la perspectiva de vista desde el cielo.
- d) Permite la interacción en vivo con la simulación de ejecución, lo que ayuda a los investigadores de METIS-II a comprender mejor el impacto de ciertos conceptos,
- e) Permite el intercambio de modelos 3D y complementos fomentando así la colaboración dentro de METIS-II y con otros proyectos y grupos.
- f) Finalmente, proporciona una herramienta para entrenamiento, educación y demostración que se basa en nuestra experiencia y habilidades cognitivas desarrolladas al usar juegos.

METIS II (2016) analiza la visualización en 3D utilizando los motores de juego que presenta UNITY 3D mediante componentes de capas de visualización como se muestra en la figura 2.30. Aunque este enfoque fue propuesto por los desarrolladores de la plataforma, está lógicamente ligado a cómo funciona Unity y cómo dictan las mejores prácticas para desarrollar entornos visuales basados en el intercambio de datos donde la capa 1 (capa lógica) es solo accesible para los desarrolladores (por lo tanto, se muestra debajo de la "línea roja"), mientras que todas las demás capas están teóricamente abiertas al mundo exterior. Es dentro de las capas 2 (capa del caso de prueba), 3 (capa de información) y 4 (capa de presentación) donde se definen los nuevos casos de uso. La capa 1 debe considerarse el núcleo, donde la información que ingresa a la plataforma se está procesando antes de ser visualizada.

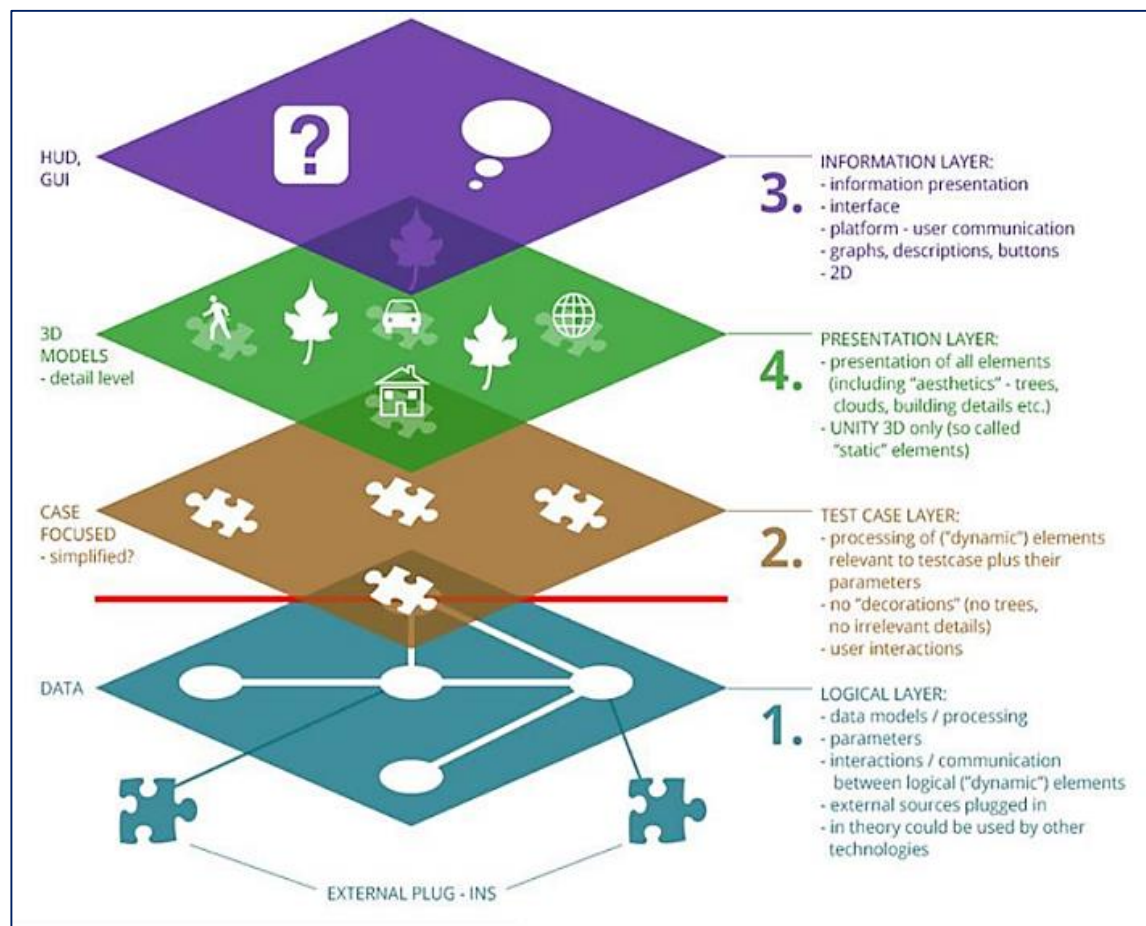


Figura 2.30: Capas de información utilizadas para la visualización en el proyecto METIS-II

Fuente: METIS II (2016)

CAPITULO 3

IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN EN LA PLATAFORMA UNITY 3D

Para explicar mejor el desarrollo de cada propuesta y a fin de uniformizar las variables para la creación del script, se recogen los datos requeridos para los cálculos de pérdidas de propagación usados por los modelos a estudiar (ITU, 3GPP y METIS) y se resumen en la tabla N°9 de manera general y se toma como referencia la figura 3.1 donde se representa:

- a) “ d_{2D} ” para hacer referencia a la proyección en el plano “x,y” de la distancia entre el emisor y receptor, a lo que METIS denomina “R”.
- b) “ d_{3D} ” para hacer referencia a la distancia en el espacio “x,y,z” entre la antena emisora y el receptor, a lo que ITU denomina “d” y 3GPP denomina “d3D” sin diferenciar si el caso es LOS o NLOS ya que ambos son modelos probabilísticos, por otro lado METIS no necesita de esa distancia para calcular las pérdidas de propagación pues lo obtiene en base a otros valores propios de la geometría del escenario.
- c) “ d_{3D1} ” para hacer referencia a la distancia entre el emisor y el punto de colisión más cercano al receptor, a lo que METIS denomina “r”.
- d) “ d_{3D2} ” para hacer referencia a la distancia entre el receptor y el punto de colisión más cercano al receptor.
- e) Llamaremos θ_1 al ángulo de elevación en un enlace con línea de vista, es decir, el ángulo que hace el rayo con el plano “x,y” y llamaremos θ_2 al ángulo de elevación que hace el rayo reflejado con el plano en un enlace sin línea de vista.
- f) “ h_m ” hace referencia a la altura promedio entre el piso y el receptor tomando como referencia la altura para una persona promedio que es de 1.6m.

g) " h_b " es la altura a la que se encuentra la antena emisora desde el piso.

h) " Δh_b " hace referencia a la altura de la antena.

Valor		Descripción
Variable	θ_1	Ángulo que hace el rayo con el plano "x,y" en sistema sexagesimal.
	θ_2	Ángulo de elevación que hace el rayo reflejado con el plano en sistema sexagesimal.
	d_{2D}	Distancia desde la proyección del emisor en el plano hasta la proyección del receptor en el plano en metros.
	d_{3D}	Distancia en el espacio desde el emisor hasta el receptor en metros.
	d_{3D1}	Distancia del receptor al punto de colisión del rayo con el obstáculo en metros
	d_{3D2}	Distancia del punto de colisión del rayo con el obstáculo hasta el emisor en metros.
Constante	h_m	1.3m
	h_b	10.5m
	Δh_b	1.5m

Tabla N°9: Tabla de variables del escenario.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3.1 se muestran dos casos: a la izquierda, el escenario con línea de vista y a la derecha, el escenario sin línea de vista donde la señal llega al receptor por reflexión.

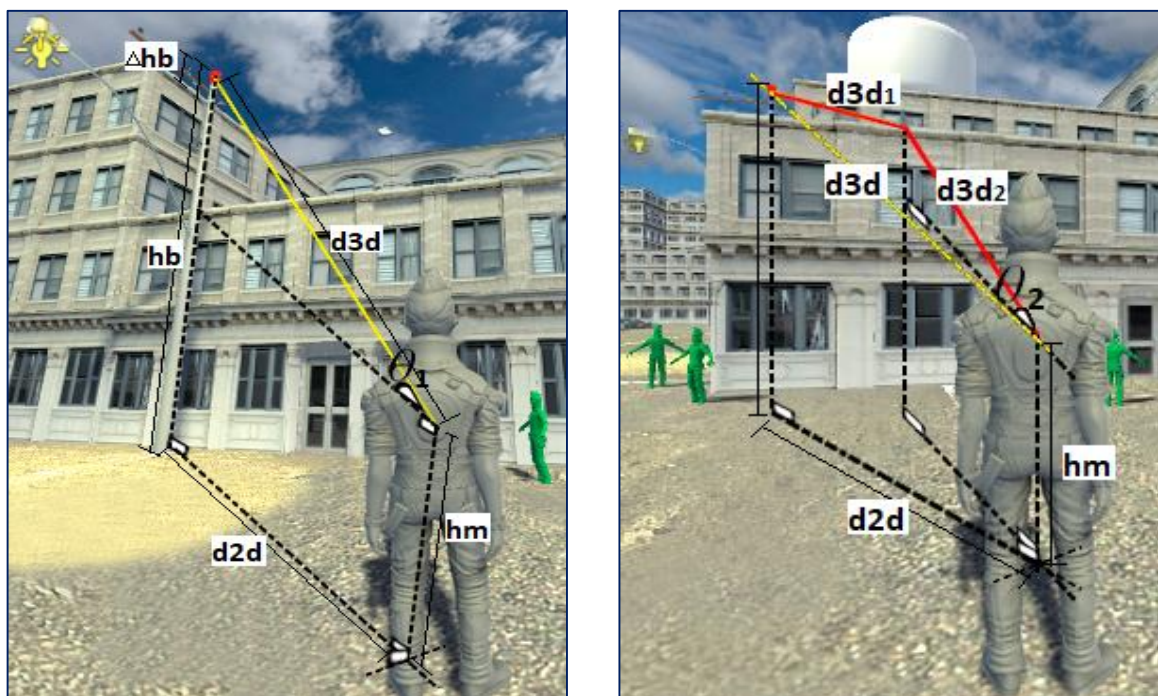


Figura 3.1: Variables del escenario

Fuente: Elaboración propia en base a visita al lugar

3.1 VARIABLES DE ESTUDIO

Para cumplir con los objetivos de la tesis se han considerado un conjunto de variables que se detallarán a continuación:

Se definieron valores con LOS y NLOS como aspectos importantes para predecir el nivel de pérdida de propagación en base al trazado de rayos, según el modelo el cual será nuestra variable independiente como se muestra en la tabla N°10.

Variable independiente	Dimensión	Indicadores	Unidad de medida	Instrumento
Modelo de Canal	Telefonía móvil	LOS	dB	Unity
		NLOS	dB	

Tabla N°10: Variable independiente.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las variables dependientes se tienen los valores de las pérdidas de propagación en el enlace con línea de vista y sin línea de vista cuyos resultados se muestran en la tabla N°11.

Cálculo de pérdidas de propagación (dB)						
Datos	Modelo ITU		Modelo 3GPP		Modelo METIS	
	LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS	NLOS
F: 28Ghz, λ : 10.714m	PLlosITU28ghz	PLNlosITU28ghz	PLlos3GPP28ghz	PLNlos3GPP28ghz	PLlosMETIS28ghz	PLNlosMETIS28ghz
F: 73Ghz, λ : 4.110m	PLlosITU73ghz	PLNlosITU73ghz	PLlos3GPP73ghz	PLNlos3GPP73ghz	PLlosMETIS73ghz	PLNlosMETIS73ghz

Tabla N°11: Variable dependiente

Fuente: Elaboración propia

3.2 DISEÑO DEL ESCENARIO

Para realizar el diseño del escenario de esta tesis se usó el software Unity en Microsoft Windows. El caso de estudio, el Centro Comercial de Gamarra, corresponde a un entorno macro urbano (UMa), el cual tiene un área total de 400m x 370m que consta de 14 manzanas, donde hay edificios de hasta 13 pisos de 3m de altura por cada piso como se muestra en la figura 3.2.



Figura 3.2: Centro Comercial Gamarra

Fuente: Elaboración propia en base a visita al lugar

3.2.1 PROCEDIMIENTO

- a) Como primer paso del diseño se recolectan datos de geometría del terreno como distancia entre las calles, área de cada tienda, alturas y formas de cada edificio. Esto se logró visitando el lugar, tomando fotos, realizando mediciones en el lugar y usando el programa Google Earth como se muestra en la figura 3.3



Figura 3.3: Centro Comercial Gamarra

Fuente: Google Earth

- b) Luego de medir cada una de las cuadras por separado, se procedió a crear el terreno a escala en la plataforma Unity. Para ello se jerarquizaron por manzanas todas las cuadras con el objetivo de tener un orden al momento de realizar las simulaciones con los haces de luz y poder identificar cual fue la trayectoria que la luz tomó y que objetos colisionaron como se muestra en la figura 3.4



Figura 3.4: Diseño por manzanas del Centro Comercial Gamarra

Fuente: Google Earth

- c) Luego, se agregaron acabados de urbanización como pistas, poste de luz, carros, semáforos, árboles y personas. Se declaran los datos de la red como se muestra en el anexo 1 y los datos de la interfaz gráfica como se muestra en el anexo 2.
- d) Después se procedió a crear el rayo con componente y “Raycast” y “Line Renderer” el cual sirve para emitir un rayo que se asemeja a la trayectoria que recorre la luz con su respectivo algoritmo en C# como se muestra en el anexo 3.
- e) Adicionalmente, se creó una nueva función en C# como se muestra en el anexo 4, la cual permite leer todas las posiciones que el usuario recorre por el centro comercial y guarda los resultados de pérdidas de propagación por cada modelo los cuales se muestran en los anexos 5,6 y 7 para luego mostrarlo en pantalla.
- f) Para la obtención de los resultados de las pérdidas de propagación se utilizó 35 puntos de medición alrededor de la antena de la estación base en 120 instantes de tiempos diferentes como se muestra en la figura 3.5 a fin de verificar y comparar los valores de pérdidas de propagación de los 3 modelos propuestos en varios instantes de tiempos por muestra y notar las diferencias de los resultados arrojados entre los modelos probabilísticos como ITU y 3GPP y un modelo basado en mapas como METIS.

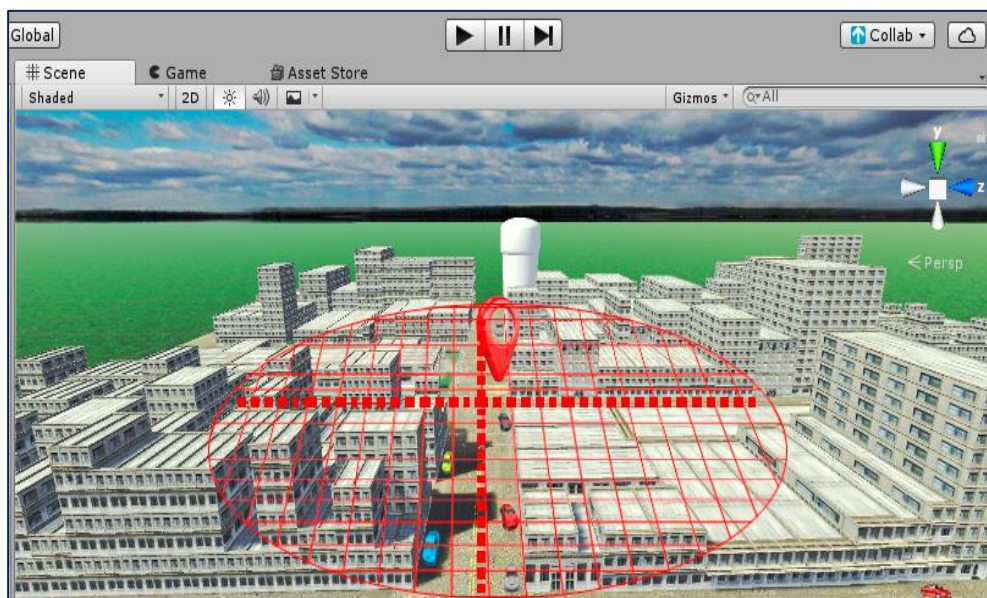


Figura 3.5: Simulación del Centro Comercial de Gamarra

Fuente: Elaboración propia

- g) Finalmente se hizo que el objeto emisor del rayo tenga un patrón de radiación de 360° en el plano horizontal y 360° en el plano vertical, con una precisión de 0.1 representando así la radiación emitida en una antena omnidireccional. Cabe mencionar que los rayos se emitirían cada vez que el usuario cambie de posición.

Las características de la antena emisora de este escenario se muestra en la tabla N°12 a continuación.

Características de la antena	
Altura	10 metros
Cobertura	400m x 370m
Frecuencia	28 GHz y 73GHz
Tipo	Omnidireccional
Banda	SHF (Super High Frequency)
Polarización	Dual

Tabla N°12: Características de la antena

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 INTERFAZ DE UNITY

Se guardan diferentes datos los cuales se van actualizando dependiendo de la posición del usuario, como los mencionados en el capítulo 2. Además, de acuerdo a lo citado en las páginas 65, 66, 68, 71, 72 y 73 se calcula la probabilidad de tener línea de vista y se compara con la variable aleatoria “a”, los cuales se van actualizando cada milisegundo y según sea la posición del usuario, estos valores se muestran en el detalle de la consola, como probabilidad de que el rayo sea con línea de vista o no “Plos” y la variable aleatoria “a” que varía entre 0 y 1.

Luego se muestran los valores de pérdidas de propagación expresado en dB, obtenidos para cada ubicación del receptor de acuerdo a cada modelo de canal (ITU, 3GPP y METIS) como se muestra en la figura 3.6.

Cabe mencionar que los scripts utilizados corren en simultáneo y se encuentran en la carpeta Assets que son colecciones de archivos y datos de Unity.

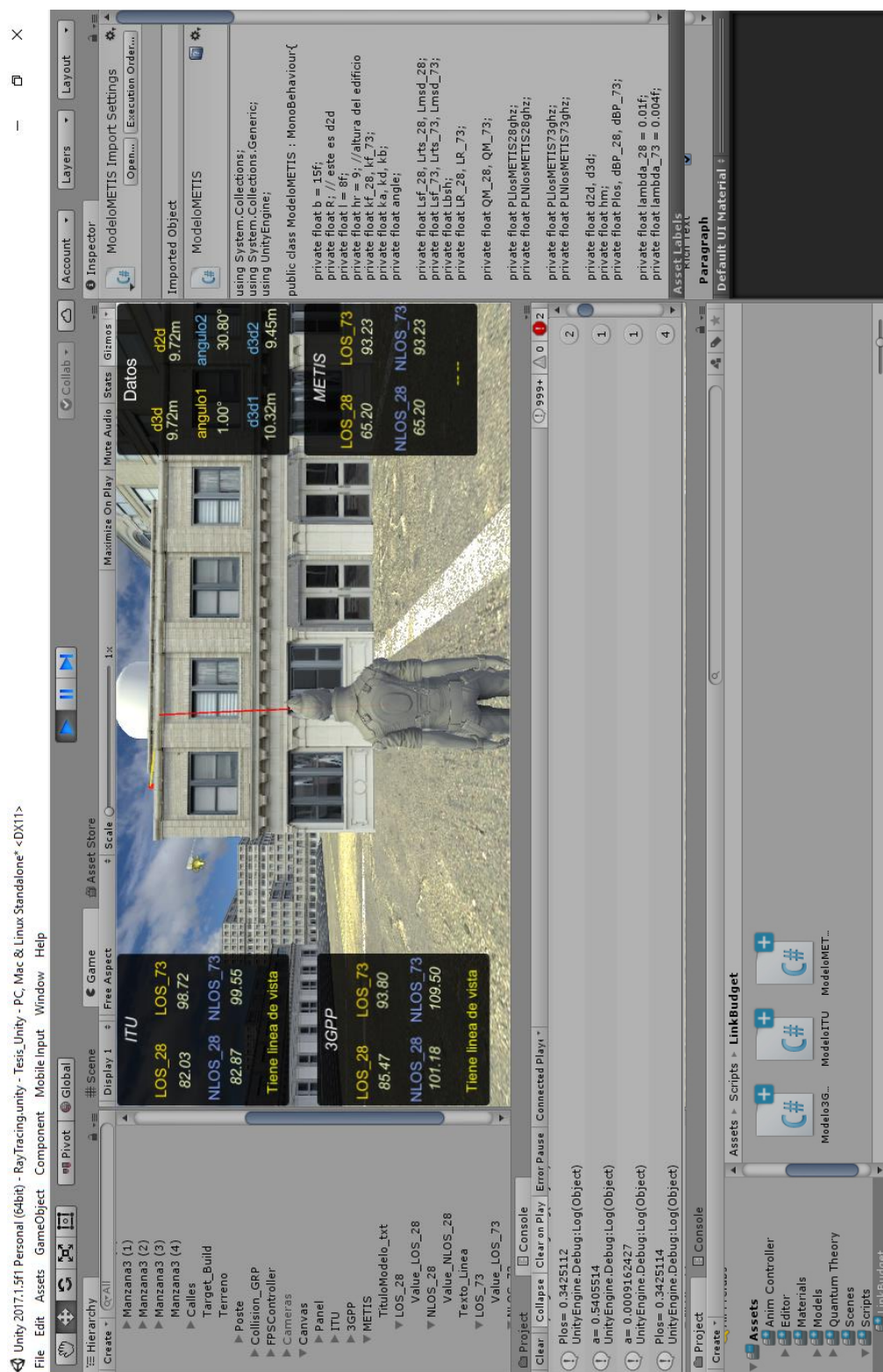
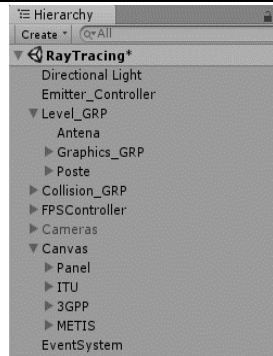


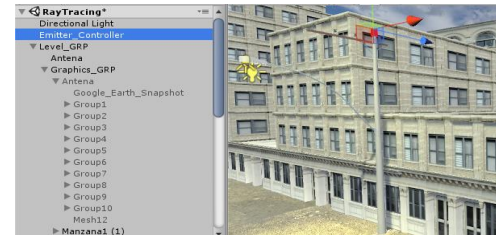


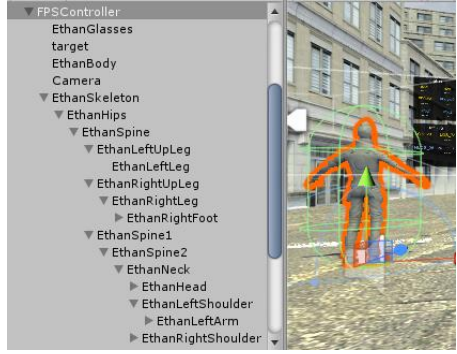
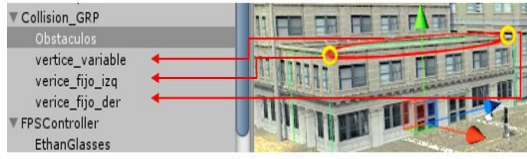
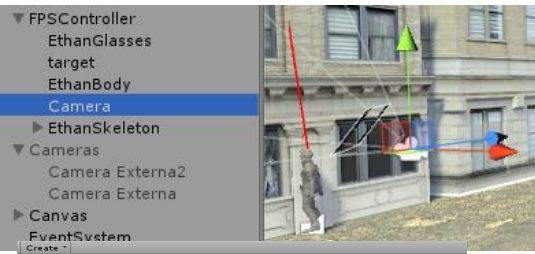
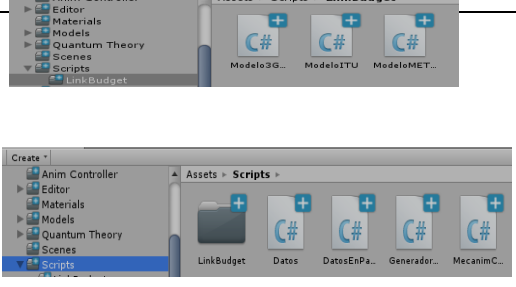
Figura 3.6: Interfaz Unity de centro comercial Gamarra – La Victoria

Fuente: Elaboración propia

3.2.3 RESUMEN DE ELEMENTOS UTILIZADOS DE UNITY

A continuación, la tabla N°13 muestra un resumen de las funciones utilizadas de Unity y su descripción.

Elemento	Característica	Interfaz gráfica
Hierarchy	La ventana Jerarquía contiene una lista de cada GameObject (referido en esta guía como un "objeto") en la escena actual y se enumeraron conforme fueron creados.	
GameObject Terrain	Para posicionar el personaje sobre una superficie.	
Texture	Las texturas fueron aplicadas en materiales, estos fueron guardados en la carpeta Assets.	
Emitter controller	Se coloca el emisor en la antena, se le agrega animaciones y se le configura el rayo del enlace.	

Rayos	El script de los rayos se llama GeneradorDeRayos y está basado en la función de Raycast de Unity. Este script es para un rayo con línea de vista y otro para cuando el enlace es sin línea de vista.	<pre> 57 void HandleRayDirect() 58 { 59 //Dirección del Rayo directo 60 dirTargetDirecto = target.position - transform.position; 61 //Genera rayo directo hacia el usuario 62 if (Physics.Raycast(transform.position, dirTargetDirecto, out RaycastHit, Mathf.Infinity)) 63 { 64 //Primer rayo directo solo se renderiza si no golpea con un obstáculo 65 if (!Hit100Direct.transform.gameObject.CompareTag("Obstaculo")) 66 { 67 //Datos_dtd = RaycastHit.distance; 68 Datos_dtd = dirTargetDirecto.magnitude; 69 Datos_angulo = 180 - Mathf.Acos(Mathf.Abs(dirTargetDirecto.x) / Mathf.Abs(dirTargetDirecto.y)) / Mathf.PI; 70 Debug.DrawRay(transform.position, dirTargetDirecto, Color.yellow); 71 } 72 } 73 else 74 { 75 Datos_dtd = RaycastHit.distance; 76 } 77 } 78 79 void HandleRayIndirect() 80 { 81 //Dirección del primer trazo del rayo indirecto hacia el vertice variable que se va actualizando dependiendo de la posición del usuario 82 dirVerticeVariable = new Vector3(verticeVariable.position.x, verticeVariable.position.y, target.position.z) - transform.position; 83 //Genera primer trazo del rayo indirecto hacia el el vertice variable a fijo 84 if (Physics.Raycast(transform.position, dirVerticeVariable, out RaycastHit, Mathf.Infinity)) 85 { 86 //Genera la dirección del trazo 2 del rayo hacia el usuario 87 dirTargetIndirecto = target.position - RaycastHit.point; 88 //Si el rayo golpea con el vertice fijo se activa el control pero que quede con el vertice fijo 89 if (!Hit1.transform.gameObject.CompareTag("VerticeFijo")) 90 { 91 //Genera el segundo trazo del rayo indirecto hacia el usuario 92 Physics.Raycast(Hit1.transform.position, dirTargetIndirecto, out RaycastHit, Mathf.Infinity); 93 //Compara si el rayo está golpeando con el vertice variable y asigna con esa lógica 94 if (!Hit1.transform.gameObject.CompareTag("VerticeVariable")) 95 { 96 Physics.Raycast(Hit1.transform.position, dirTargetIndirecto, out RaycastHit, Mathf.Infinity); 97 //Compara si el rayo está golpeando con el vertice fijo y asigna con esa lógica 98 if (!Hit2.transform.CompareTag("VerticeFijo")) 99 { 100 Datos_dtdtd = Datos_dtd + Datos_dtd2; 101 } 102 } 103 } 104 } 105 } </pre>
First Person Controller	Se configuraron características en el receptor o personaje, como: movimiento, tamaño promedio de extremidades de una persona de 1.6m, la altura a la cual lleva el celular. Su controlador se encuentra en la antena.	
Collision_GRP	Se configuran los vértices y aristas de los objetos que serán colisiones para el rayo incidente del enlace móvil.	
GameObject Camera	Para representar la vista del juego en tercera persona. Se crearon 2 en cada frente de la antena y 1 para el frente del personaje.	
Scripts	Se crearon 7 Scripts: 4 para generar el escenario realista en clases y 3 que corresponden al cálculo de las pérdidas de propagación para cada modelo. El detalle del	

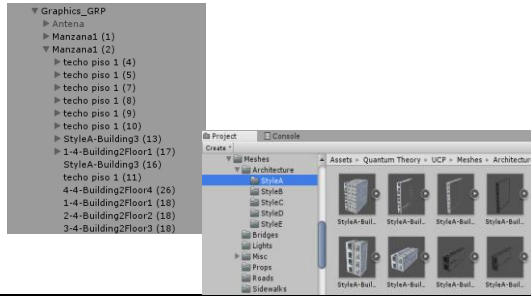

	desarrollo se puede ubicar en los anexos.	
Prefab	Los prefabs son objetos reutilizables, como las calles, pistas, poste, techos, edificios que se agruparon por manzanas y algunos Assest que fueron importados.	
Canvas	<p>Representa el espacio abstracto en el que se presenta y representa la interfaz de usuario (UI).</p> <p>Los modos disponibles son: espacio de pantalla - superposición, espacio de pantalla - cámara y espacio mundial.</p> <p>En ese espacio se presentan los datos y valores de pérdidas de propagación.</p>	

Tabla N°13: Resumen de elementos utilizados de Unity.

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO 4

MEDICIONES Y RESULTADOS

4.1 GENERAL

Se registran y se almacenan todas las posiciones del usuario, las rutas alcanzadas por el rayo a medida que se va moviendo el usuario, las distancias que existen entre los rayos, su tiempo de demora, los ángulos de elevación y azimut que hacen los rayos en condiciones LOS y NLOS así como los cálculos de pérdidas de propagación por cada modelo de canal (ITU, 3GPP y METIS).

Partiendo del hecho que tenemos el escenario simulado y se sabe visualmente en qué zonas hay enlaces con línea de vista y en qué zonas no, previo al cálculo usado por cada modelo de propagación, entonces se procede a verificar efectividad de los modelos de nuestro estudio.

Además, se recogen datos para varios instantes de tiempo en un mismo punto, a fin de comprobar el error que consideran los modelos ITU y 3GPP pues al ser probabilísticos, manejan una tasa de incertidumbre, es decir para un mismo punto de medición se puede tener varios valores de pérdidas de propagación. Por otro lado, el modelo METIS, al ser determinístico, debería arrojar un resultado único por cada punto de muestra.

4.1.1 ENLACE CON LINEA DE VISTA

a) Cálculo de la probabilidad de tener línea de vista

Del escenario, se toman 90 muestras de mediciones para zonas con línea de vista en varios tiempos donde se observa que los modelos ITU y 3GPP arrojan tener y no tener línea de vista para diferentes tiempos de una misma muestra.

En la figura 4.1 para cada muestra se compara un valor aleatorio “a” que varía entre 0 y 1 y el valor de la probabilidad de tener línea de vista, donde los aciertos serían aquellos que resulten de un “ $P_{los} > a$ ” (valores debajo de la curva azul) y los errores serían los valores que resulten de un “ $P_{los} < a$ ” (valores por encima de la curva azul)

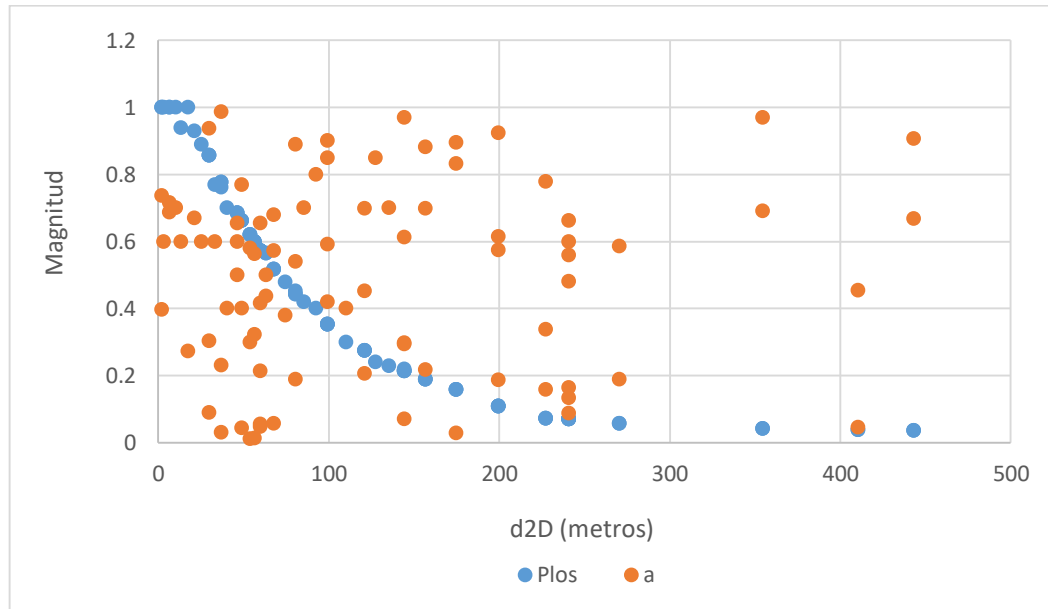


Figura 4.1: Relación de probabilidad de tener línea de vista Vs el valor aleatorio “a”

Fuente: Elaboración propia

De esta figura se nota que la probabilidad de tener línea de vista disminuye con la distancia entre el emisor y receptor, en otras palabras, los modelos ITU y 3GPP van teniendo mayor margen de error a medida que la distancia crece.

b) Cálculo de pérdidas de propagación

En las figuras 4.2 y 4.3 se grafican los valores de pérdidas de propagación obtenidos en las bandas 28GHz y 73GHz respectivamente, para los tres modelos de canal con línea de vista, de donde se observa que a distancias cortas (menor a 20m), los modelos ITU y 3GPP toman valores cercanos, mientras que el modelo METIS es más pesimista y su resultado dista mucho de los otros dos (alrededor de 20dB adicionales con respecto a los dos primeros modelos mencionados).

Además, se comprueba que el modelo METIS tiene resultados únicos de pérdidas de propagación en diferentes tiempos de una misma muestra.

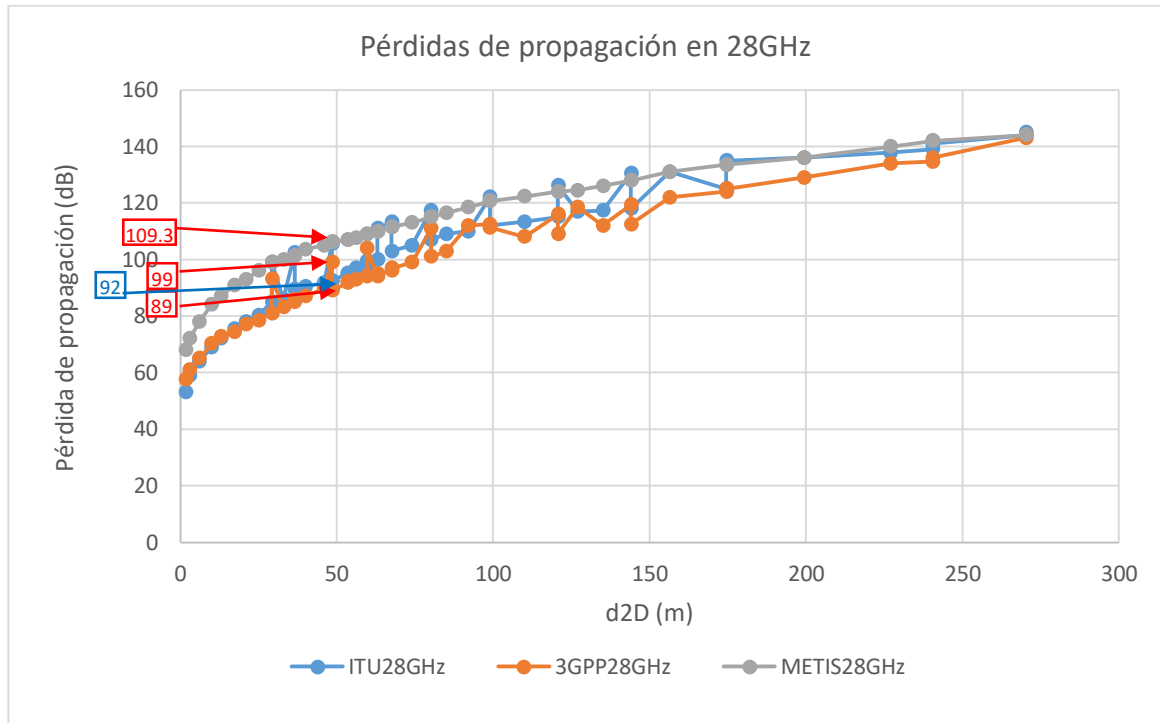


Figura 4.2: Comparación de pérdidas de propagación a 28GHz con línea de vista del Centro comercial Gamarra.

Fuente: Elaboración propia

De la figura 4.2 se observa que a 48.56 m del emisor para 2 tiempos diferentes:

- El modelo METIS mide una pérdida de propagación única de 109.3dB
- El modelo ITU arroja 2 valores de pérdida de propagación, en un primer instante considera tener línea de vista con 89 dB y en el otro instante considera no tener línea de vista dando como pérdida de propagación 99 dB.
- Para 3GPP arroja un valor de 92dB, el cual se diferencia del valor de ITU en 3dB.
- Estos resultados a lo largo de todas las muestras tomadas, reflejan que los valores LOS, en zonas con línea de vista para ITU y 3GPP distan entre 2dB y 7dB.

Y los valores NLOS, en zonas donde no hay línea de vista, de ITU y 3GPP a una misma distancia del emisor, distan alrededor de 15dB adicionales con respecto al resultado medido con LOS.

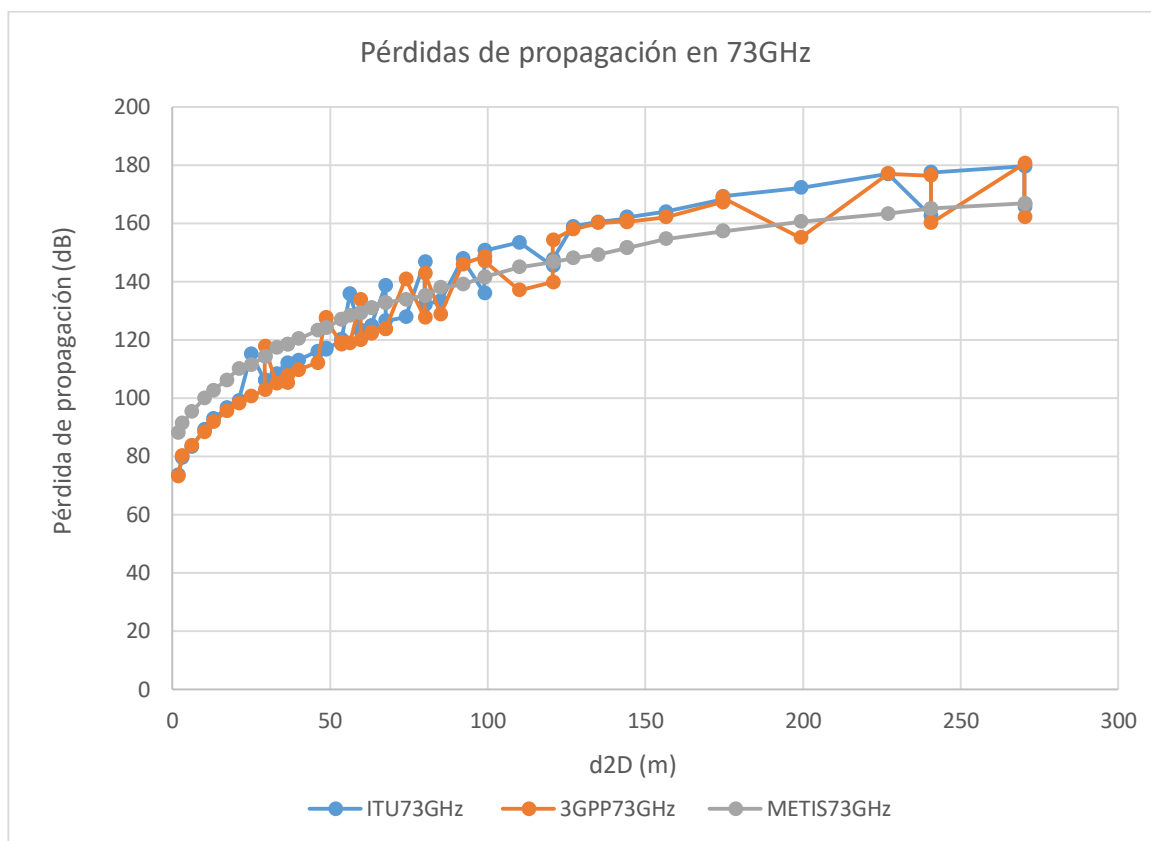


Figura 4.3: Comparación de pérdidas de propagación a 73GHz con línea de vista del Centro comercial Gamarra.

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 ENLACE SIN LINEA DE VISTA

a) Cálculo de la probabilidad de tener línea de vista

Del escenario, se toman 70 muestras en varios tiempos, partiendo de mediciones en zonas donde topográficamente no se tiene línea de vista y se observa que los modelos ITU y 3GPP arrojan tener y no tener línea de vista para diferentes tiempos de una misma muestra.

En la figura 4.4 para cada muestra se compara un valor aleatorio "a" que varía entre 0 y 1 y el valor de la probabilidad de tener línea de vista, donde los aciertos serían aquellos que

resulten de un “ $P_{los} < a$ ” (valores por encima de la curva azul) y errores serían los valores que resulten de un “ $P_{los} > a$ ” (valores por debajo de la curva azul)

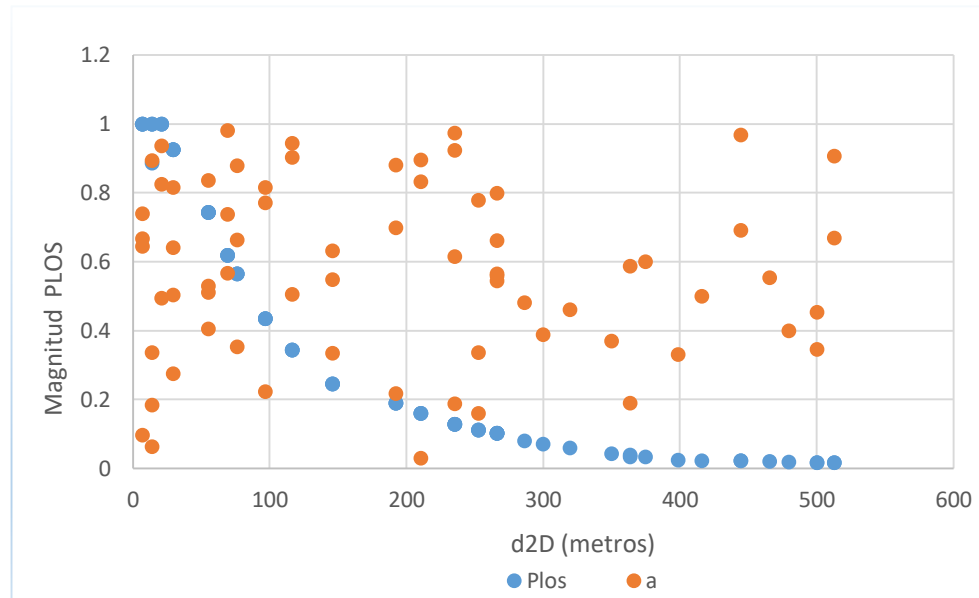


Figura 4.4: Relación de probabilidad de tener línea de vista Vs el valor aleatorio “a”

Fuente: Elaboración propia

De esta figura se nota una vez más que la probabilidad de tener línea de vista disminuye con la distancia entre el emisor y receptor, en otras palabras, a medida que la distancia crece, para ITU y 3GPP los valores de pérdidas de propagación consideran no tener línea de vista. En otras palabras, en este caso para NLOS estos modelos van teniendo mayor porcentaje de acierto a medida que la distancia crece.

b) Cálculo de pérdidas de propagación

En las figuras 4.5 y 4.6 se grafican los valores de pérdidas de propagación obtenidos en las bandas 28GHz y 73GHz respectivamente, para los tres modelos de canal en zonas donde no hay línea de vista, de donde se observa que a distancias cortas (menor a 20m), los modelos ITU y 3GPP toman valores cercanos, mientras que el modelo METIS es más pesimista y su resultado dista mucho de los otros dos (alrededor de 20dB adicionales con respecto a los modelos ITU y 3GPP).

Por otro lado, los resultados de estos tres modelos se asemejan mientras más lejos se encuentre el receptor de la antenna emisora.

Además, se comprueba que el modelo METIS tiene resultados únicos de pérdidas de propagación en diferentes tiempos de una misma muestra.

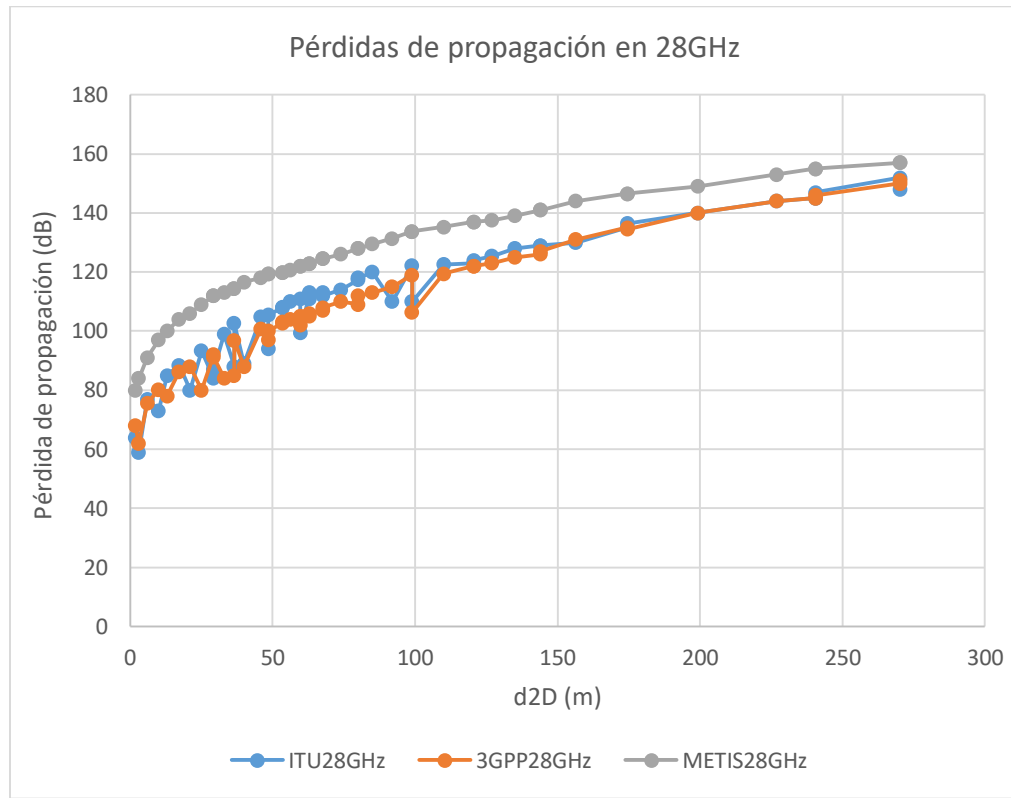


Figura 4.5: Comparación de pérdidas de propagación a 28GHz sin línea de vista del Centro comercial Gamarra.

Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que al comparar los valores de pérdidas de propagación LOS y NLOS para una misma distancia y frecuencia, los valores NLOS arrojan valores adicionales entre 8 y 15dB a los que arroja cuando el escenario considera tener LOS.

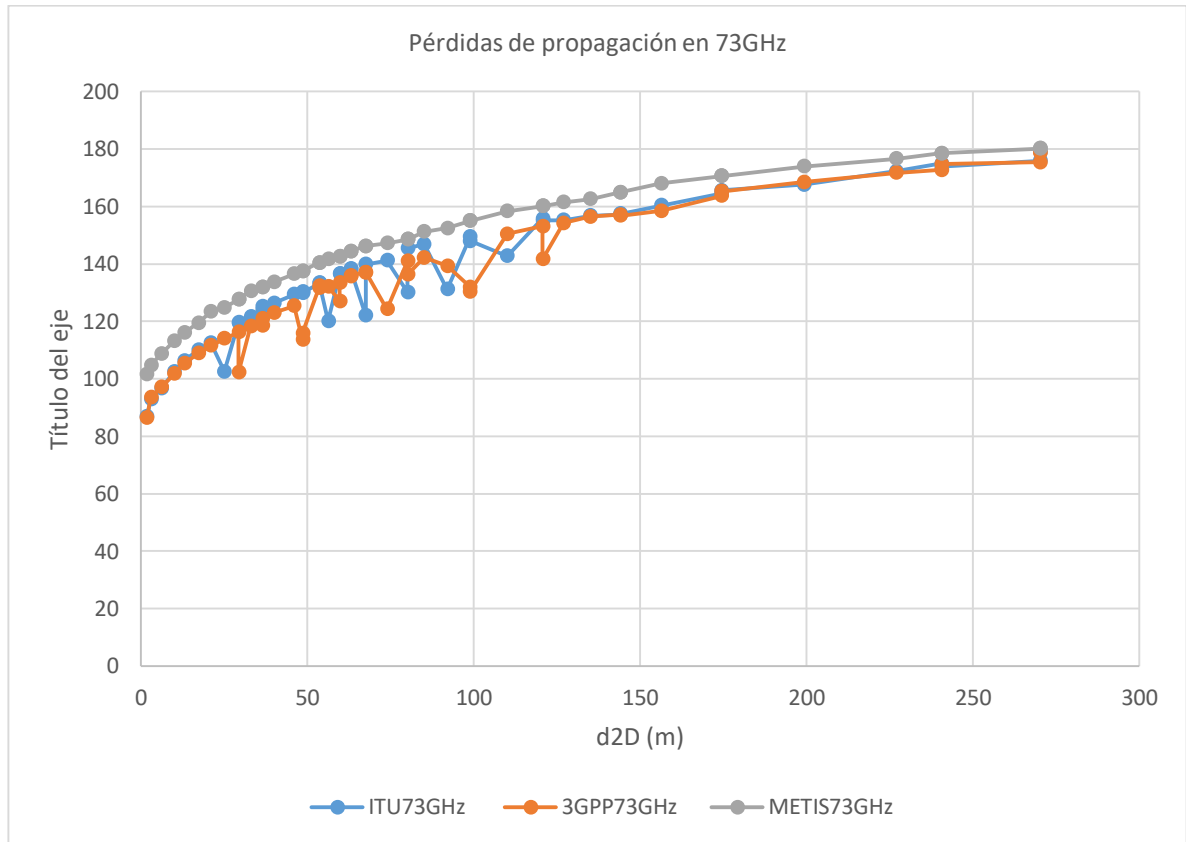


Figura 4.6: Comparación de pérdidas de propagación a 73GHz sin línea de vista del Centro comercial Gamarra.

Fuente: Elaboración propia

4.2 INTERPRETACIÓN DE LAS MEDICIONES

Como se mencionó en la sección 4.1, los modelos ITU y 3GPP consideran una función de probabilidad que definen si el enlace tendría o no tendría línea de vista, por ello en las

mediciones realizadas en el Centro comercial Gamarra, bajo estos modelos se obtienen resultados diferentes para cada instante de tiempo en una misma posición del sujeto, es decir, hay un margen de aciertos para cada uno de estos modelos. Por otro lado el modelo METIS toma valores únicos para cada posición de la muestra tomada.

En la tabla N°14 se resumen los resultados.

PORCENTAJE DE ACIERTOS				
MODELO	28GHz		73GHz	
	LOS	NLOS	LOS	NLOS
ITU	67.35 %	69.39 %	63.27 %	87.76 %
3GPP	61.22 %	75.51 %	59.18 %	79.59 %
METIS	100 %	100 %	100 %	100 %

Tabla N°14: Porcentajes de aciertos para los modelos ITU, 3GPP y METIS

Fuente: Elaboración propia

Al comparar gráficamente las medidas obtenidas con línea de vista (LOS) y sin línea de vista (NLOS), se puede ver que los resultados del modelo METIS son los mismos para diferentes instantes de tiempo ya que al considerar medidas reales del escenario, identifica si el enlace es LOS o NLOS previamente, dando un porcentaje de acierto al 100% a diferencia de los métodos que usan los modelos ITU-R y 3GPP-3D, los cuales toman medidas directas sin considerar el escenario de prueba y por ello arrojan resultados diferentes para un mismo punto en diferentes instantes de tiempo. Por ello el modelo de canal apropiado para ondas milimétricas es METIS

De los resultados obtenidos en el apartado anterior se concluyen 4 casos diferentes de mediciones los cuales se resumen en la tabla N°15 donde se explicarán con ejemplos, sobre el funcionamiento de la simulación, los aciertos y errores de los modelos ITU y 3GPP y las ventajas del modelo METIS.

TIPO DE ENLACE	CERCA DE LA ESTACIÓN BASE	LEJOS DE LA ESTACIÓN BASE
----------------	---------------------------	---------------------------



Figura 4.7: Caso 1 de medición.

Fuente: Elaboración propia

Análisis para los modelos ITU y 3GPP: Para este instante de tiempo se calcula:

$P_{los} = 1$, $a = 0.6761047$ entonces $P_{los} > a$

En teoría, este resultado indica que sería un enlace con línea de vista (LOS) entonces el script escribe en amarillo “tiene línea de vista”.

Análisis para el modelo METIS: este modelo determina el tipo de enlace basándose en las características del mapa, por ello, para este instante, en el escenario se observa que el enlace es con línea de vista y arroja un único valor.

Ambos modelos denotan que corresponden a un escenario con línea de vista, entonces marcamos los resultados LOS y los comparamos:

	LOS	ITU	3GPP	METIS
28Ghz		64.56 dB	65.04 dB	78.00 dB
73Ghz		83.87 dB	83.67 dB	95.21 dB

Se observa que los modelos ITU y 3GPP toman valores similares pero el modelo METIS es más pesimista, ello indica que, para corta distancia, METIS es menos preciso en el cálculo de pérdida de propagación.

CASO 2: El usuario se encuentra cerca de la estación base y el enlace es de tipo NLOS como se muestra en la figura 4.10.

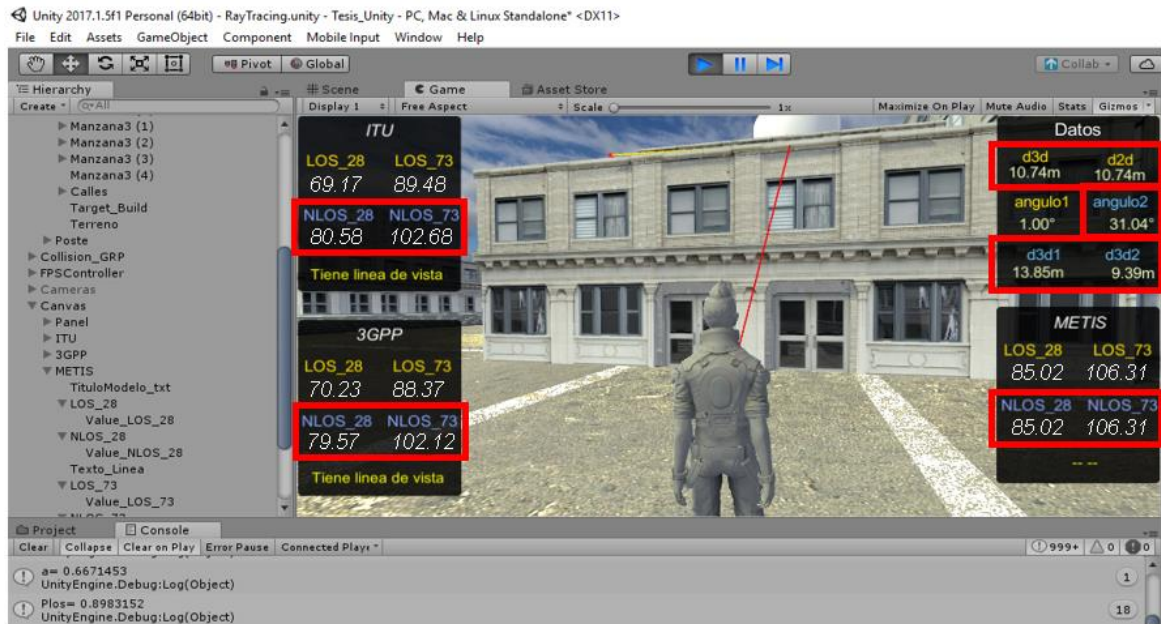


Figura 4.8: Caso 2.1 de medición.

Fuente: Elaboración propia

Análisis para los modelos ITU y 3GPP: Para este instante de tiempo se calcula:

$P_{los} = 0.8983152$, $a = 0.6671453$ entonces $P_{los} > a$

En teoría, este resultado indica que sería un enlace con línea de vista (LOS) entonces el script escribe en amarillo “tiene línea de vista”.

Análisis para el modelo METIS: Del escenario 3D realista se observa que corresponde a un enlace sin línea de vista, donde el rayo incidente choca en el edificio y uno de los rayos reflejados (rayo rojo) llega al usuario.

Se verifica así que el modelo basado en mapas es más exacto y marcamos los resultados NLOS y los comparamos:

LOS	ITU	3GPP	METIS
28Ghz	80.58 dB	79.57 dB	85.02 dB
73Ghz	102.68 dB	102.12 dB	106.31 dB

Se verifica que los modelos probabilísticos ofrecen un rango de incertidumbre, es decir, en este caso el tipo de enlace que refiere ITU y 3GPP no corresponde al que refiere METIS pero existe otro caso en el que si corresponde como el caso 1 para LOS y el siguiente para NLOS como se muestra en la figura 4.11.

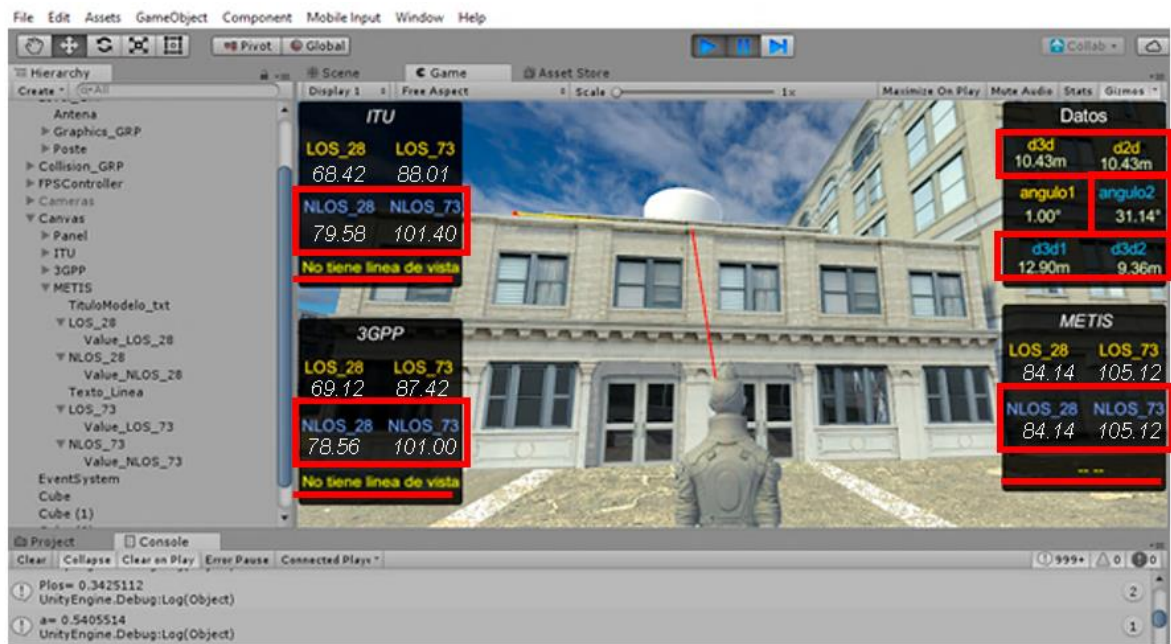


Figura 4.9: Caso 2.2 de medición.

Fuente: Elaboración propia

Análisis para los modelos ITU y 3GPP: Para este instante de tiempo se calcula:

$P_{los} = 0.3425112$, $a = 0.5405514$ entonces $P_{los} < a$

En teoría, este resultado indica que sería un enlace sin línea de vista (NLOS) entonces el script escribe en amarillo “no tiene línea de vista”.

Análisis para el modelo METIS: El escenario 3D realista corresponde a un enlace sin línea de vista.

Entonces marcamos los resultados NLOS y los comparamos:

LOS	ITU	3GPP	METIS
28Ghz	79.58 dB	78.56 dB	84.14 dB
73Ghz	101.40 dB	101.00 dB	105.12 dB

CASO 3: El usuario se encuentra lejos de la estación base y el enlace es de tipo LOS como se muestra en la figura 4.12.

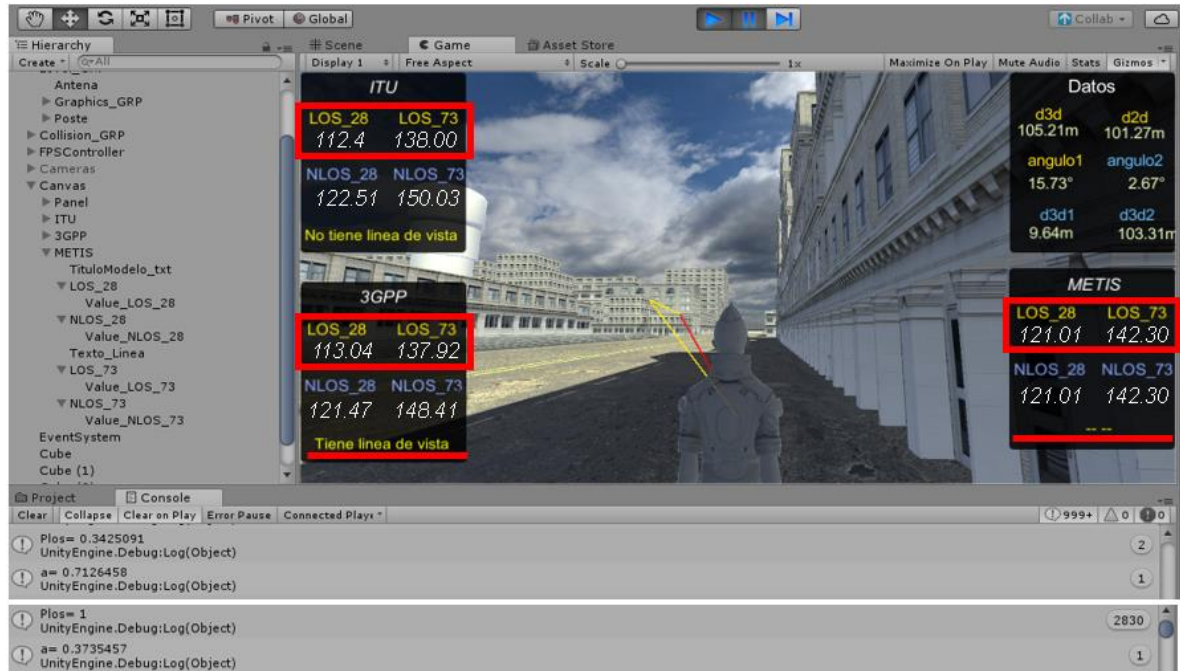


Figura 4.10: Caso 3 de medición.

Fuente: Elaboración propia

Análisis para el modelo ITU:

Para un instante de tiempo t_1 se calcula: $P_{los}=0.3425091$, $a = 0.7126458$ entonces $P_{los} < a$

En teoría, este resultado indica que sería un enlace sin línea de vista (NLOS) entonces el script escribe en amarillo “no tiene línea de vista”.

Análisis para el modelo 3GPP:

Para el mismo instante de tiempo t_1 se calcula: $P_{los}=1$, $a = 0.3735457$ entonces $P_{los} > a$

En teoría, este resultado indica que sería un enlace con línea de vista (LOS) entonces el script escribe en amarillo “tiene línea de vista”.

Análisis para el modelo METIS: Para este instante, se observa que el enlace es con línea de vista, entonces marcamos los resultados LOS y los comparamos:

LOS	ITU	3GPP	METIS
28Ghz	112.40 dB	113.04 dB	121.01 dB
73Ghz	138.00 dB	137.92 dB	142.30 dB

CASO 4: El usuario se encuentra lejos de la estación base y el enlace es de tipo NLOS como se muestra en la figura 4.13.

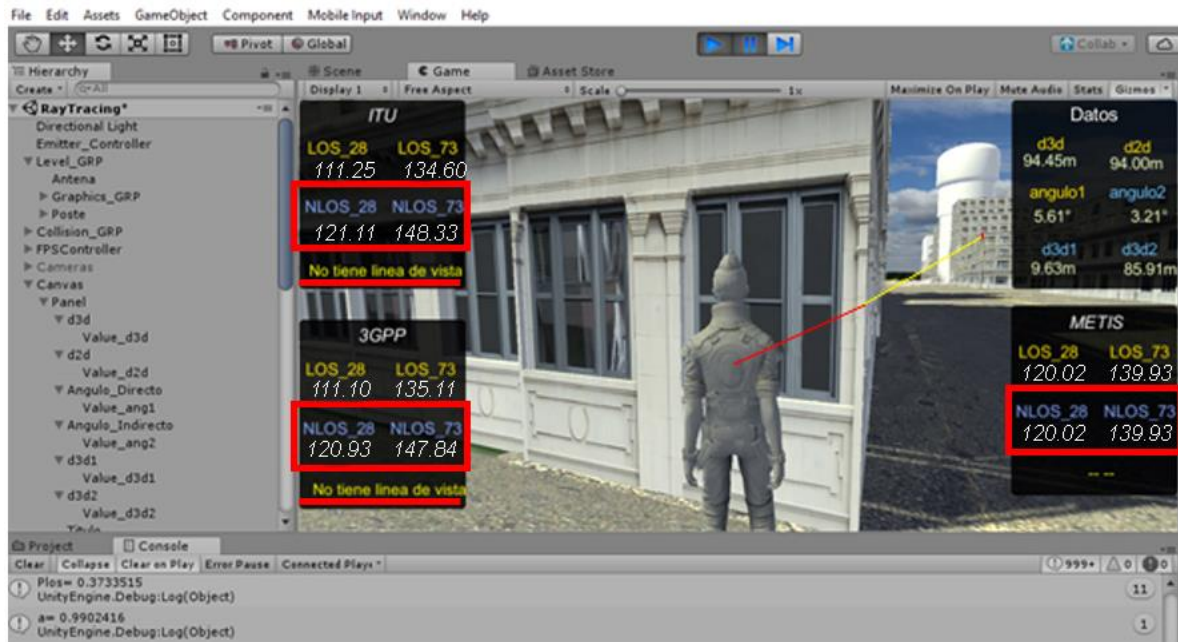


Figura 4.11: Caso 4 de medición.

Fuente: Elaboración propia

Análisis para los modelos ITU y 3GPP: Para este instante de tiempo se calcula:

$P_{los} = 0.3733515$, $a = 0.9902416$ entonces $P_{los} < a$

En teoría, este resultado indica que sería un enlace sin línea de vista (LOS) entonces el script escribe en amarillo “no tiene línea de vista”.

Análisis para el modelo METIS: Del escenario 3D realista se observa que corresponde a un enlace sin línea de vista, donde el rayo incidente choca en el edificio y uno de los rayos reflejados (rayo rojo) llega al usuario.

LOS	ITU	3GPP	METIS
-----	-----	------	-------

Se verifica así que los tres modelos coinciden y marcamos los resultados

28Ghz	121.11 dB	120.93 dB	120.02 dB
73Ghz	148.33 dB	147.84 dB	139.93 dB

NLOS y los comparamos:

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

- a) La caracterización y simulación de los modelos de canal para la red de quinta generación permiten evaluar adecuadamente las prestaciones y desempeño de esta tecnología.
- b) Se ha realizado una evaluación y simulación de los modelos de canal estadísticos y determinísticos para ondas milimétricas propuestos por el 3GPP, IMT-Advanced y METIS en un escenario realista que corresponde al Centro Comercial de Gamarra en el distrito de La Victoria, Lima-Perú. Donde, se ha demostrado que el modelo basado en mapa de METIS es el adecuado para la evaluación del canal de radio de la 5G debido a que considera la geometría del escenario.
- c) El entorno simulado proporciona un control total de los contenidos, incluida la comprensión total de la naturaleza de cada elemento de la escena, un entorno de simulación puede producir conjuntos prácticamente infinitos de datos de entrenamiento y evaluación con anotaciones absolutamente precisas en una multitud de situaciones que pueden diseñarse para situaciones específicas.
- d) Al comparar gráficamente las medidas obtenidas con línea de vista (LoS) y sin línea de vista (NLOS), se puede ver que los resultados del modelo METIS son los mismos para diferentes instantes de tiempo ya que al considerar medidas reales del escenario, identifica si el enlace es LOS o NLOS previamente, en cambio los métodos de ITU-R y 3GPP-3D los cuales toman medidas directas sin considerar el escenario de prueba y por ello arrojan resultados diferentes para un mismo punto en diferentes instantes de tiempo. Por ello el modelo de canal apropiado para ondas milimétricas es METIS. Analizando el rendimiento computacional, es importante indicar que el modelo de METIS consume mayores recursos computacionales. Sin embargo, la constante evolución de las CPU y GPU permitirán usar modelos semi y deterministas para una adecuada evaluación del canal de radio.

- e) En las bandas de ondas milimétricas, hay atenuación significativa debido a los fenómenos asociados a la propagación radio por ende estas bandas de frecuencia no pueden ser usadas en aplicaciones de larga distancia.
- f) Las ondas milimétricas son imprescindibles para guiar la transformación hacia las redes 5G por las características que presenta, como disponibilidad del ancho de banda, que supone un aumento de la capacidad de datos y la correspondiente disminución de latencia, con las ventajas adicionales del uso de una longitud de onda menor que permite el empleo de técnicas de procesamiento espacial y polarización como MIMO y conformado de rayos.

RECOMENDACIONES

- a) Se recomienda usar las plataformas de juego como Unity para diseñar simulaciones de redes inalámbricas super realistas.
- b) Se recomienda ampliar el presente modelo usando parámetros de pequeña escala descritos en la recomendación TR 38.901 del 3GPP; puesto que esta investigación sólo considera el cálculo de las pérdidas de trayectoria a gran escala.
- c) En altas frecuencias existe interferencia con el oxígeno y la lluvia, y por ende se recomienda investigación adicional para garantizar una mayor precisión.
- d) El escenario implementado en esta investigación, puede ser utilizado como parte de la enseñanza para el desarrollo de las tecnologías en las redes 5G, porque al realizar todos los cálculos, simplifica el uso y aplicación de los modelos de propagación del IMT, 3GPP y METIS

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Goldsmith, «Wireless Communications» Stanford University, pg 25-30, 2004.
- [2] A. Hes-Shafi, «Analysis of Propagation Models for WiMAX at 3.5 GHz» Karlskrona, Sweden, pg. 20-21, 2009.
- [3] A. Navarro, D. Guevara y J. Gómez, «Modelado de canal inalámbrico empleando técnicas de trazado de rayos: Una revisión sistemática» Revista S&T, pg. 87-101, 2014.
- [4] A. Osseiran, J. Monserrat y P. Marsch, «5G Mobile and Wirelles Communicactions Technology» 2016.
- [5] A. Pirmoradian, «An Analytical Evaluation of Energy Consumption in Cooperative Cognitive Radio Networks, Kyoto: International Telecommunication Union (ITU) Kaleidoscope» 2013.
- [6] A. Tahat, Y. Alqudah, «Analysis of propagation models at 2.1GHz for simulation of a live 3G cellular network» 2011.
- [7] C. Johnk, «Teoria electromagnetica/Engineering Electromagnetic: Campos y ondas/Fields and Waves» LIMUSA, 2004.
- [8] C. Larsson, F. Harrysson, B. Olsson, J. Berg «An Outdoor-to-Indoor Propagation Scenario at 28 GHz» EuCAP, 2014.
- [9] C. Oestges, G. Hennaux y Q. Gueuning, «Centimeter- and Millimeter-Wave Channel Modeling Using Ray-Tracing for 5G Communications» IEEE, Bélgica, 2015.
- [10] Deliverable D6.1 « Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society (METIS)» 2013.
- [11] Deliverable D8.4, «Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society (METIS). METIS final project report» 2015.
- [12] Ericsson, «On the pluse of the networked society» Ericsson Mobility Report, pg. 2-16, 2015.

- [13] ETSI, «New ETSI Group on Millimetre Wave» 2015. Disponible en el sitio web: <http://www.etsi.org/newsevents/news/866-2015-01-press-new-etsi-group-on-millimetre-wavetransmission-starts-work>.
- [14] F. García, «Física con ordenador» 2003. Disponible en el sitio web: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/trevino_c_jt/capitulo_2.html#
- [15] J. Lee, J. Liang, M.-D. Kim, J.-J. Park, B. Park y H. Kyu Chung, «Measurement-Based Propagation Channel Characteristics for Millimeter-Wave 5G Giga Communication Systems» ETRI Journal, vol. 38, pg. 1031–1041, 2016.
- [16] J. Rábanos, «Telecomunicaciones móviles» Serie: Mundo electrónico, Segunda edición ed., Marcombo, pg. 258-359, 1998.
- [17] J. Santos, «Manual de óptica geométrica» 2018. Disponible en el sitio web: https://www.ua.es/personal/jsb/MOG_Completo.pdf
- [18] K. Haneda, et. al. «5G 3GPP-like Channel Models for Outdoor Urban Microcellular and Macrocellular Environments» 2016.
- [19] K. Haneda, J. Zhang, L. Tian, G. Liu, Y. Zheng, H. Asplund, J. Li, Y. Wang, D. Steer, C. Li, T. Balercia, S. Lee, Y. Kim, A. Ghosh, T. Thomas, T. Nakamura, Y. Kakishima, T. Imai, H. Papadopoulos, T. Rappaport, G. MacCartney, M. Samimi, S. Sun, O. Koymen, S. Hur, J. Park, C. Zhang, E. Mellios, A. Molisch, S. Ghassemzadeh y A. Ghosh, «5G 3GPP-like Channel Models for Outdoor Urban Microcellular and Macrocellular Environments» IEEE, 2016.
- [20] Leopedrini, « ¿Qué es ISI (Interferencia entre símbolos) en LTE?» 2014. Curso disponible en el sitio web: <http://www.telecomhall.com/what-is-isi-inter-symbol-interference-in-lte.aspx>
- [21] L. Scricca, « Planificación de redes LTE» Universidad Politécnica de Madrid, 2013.
- [22] METIS II, «Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society-II Deliverable D7.2 Preliminary 5G Visualization Version: V1.0 2016-12-31» 2016.
- [23] mmMAGIC, «Measurement Campaigns and Initial Channel Models for Preferred Suitable Frequency Ranges» Deliverable D2.1, pg. 1-136, 2016.
- [24] mmMAGIC, «Measurement Campaigns and Initial Channel Models for Preferred Suitable Frequency Ranges H2020-ICT 671650-mmMAGIC/D2.1 v1.0» 2016.
- [25] M. Samimi y T. Rappaport, «3-D Millimeter-Wave Statistical Channel Model for 5G Wireless System Design» IEEE, 2016.

- [26] M. Sierra, M. Moreno, I. Vilchez, R. Barrigón, J. Gómez, V. Carmona del Río, R. Gozalo, G. Prieto «Medición del efecto doppler en tráfico rodado» 2012.
- [27] M. Shafi, J.Zhang, H.Tataria, A. Molisch, S. Sun, T. Rappaport, F. Tufvesson, S. Wu, and K. Kitao, «Microwave vs. Millimeter-Wave Propagation Channels: Key Differences and Impact on 5G Cellular Systems» 2018.
- [28] M. Zheng, Z. Zhengquan, D. Zhiguo, F. Pingzhi y L. Hengchao, «Key techniques for 5G wireless communications: network architecture, physical layer, and MAC layer perspectives» China: Springer-Verlag, 2015.
- [29] M.2376-0, «Technical feasibility of IMT in bands above 6GHz» 2015.
- [30] NIST. Disponible en el sitio web: <http://www.nist.gov/ctl/wireless-networks/>
- [31] P. Rodríguez, « Estudio del Fenómeno de Difracción de la Luz» 2017. Disponible en el sitio web: <https://www.coursehero.com/file/27053152/practica-6-y-7-de-lab-de-fisica-4docx/>
- [32] P. Zhouyue y K. Farooq, «An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems» IEEE Communications Magazine, vol. 49, pg. 101-107, 2011.
- [33] R. Theodore, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Avar, K. Wang, G. Wong, J. Schulz, M. Samimi y F. Gutierrez, «Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!» *IEEE*, vol. 1, pg. 335–349, 2013.
- [34] R. Verdone y A. Zanella, «Pervasive Mobile and Ambient Wireless Communications: COST Action 2100» Springer, 2012.
- [35] S. Haykin, «Sistemas de comunicación» McMaster University, 2016..
- [36] T.S. Rappaport,, «Wireless Communications - Principles and Practice» 2nd Edition, Prentice Hall, 2001.
- [37] T. Rappaport, Y. Xing, G. MacCartney, A. Molisch, E. Mellios y J. Zhang, «Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-generation (5G) Wireless Networks-with a focus on Propagation Models» IEEE Transactions on Antennas and Propagation, pg. 1-15, 2017.
- [38] TR 38.901 version 14.0.0 Release 14 «5G: Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz» 3GPP, 2017.
- [39] UIT-R F.1093-2, «Efectos de la propagación multitrayecto en el diseño y funcionamiento de los sistemas inalámbricos fijos digitales con visibilidad directa» 2006.

- [40] UIT-R P.1411-2, «Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de los sistemas de radiocomunicaciones de exteriores de corto alcance y redes de radiocomunicaciones de área local en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz» 2003.
- [41] UIT-R V.431-7, «NOMENCLATURE OF THE FREQUENCY AND WAVELENGTH BANDS USED IN TELECOMMUNICATIONS» 2000.
- [41] V. C. Torrecillas, «Programación de una herramienta de trazado de rayos 3D basada en GO y UTD» Cartagena, 2008.
- [42] W. Roh, J. Yun Seol y J. Park, «Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results» IEEE Communications Magazine, vol. 52, pg. 106 - 113, 2014.
- [43] Z. Yun y M. Iskander, «Ray Tracing for Radio Propagation Modeling: Principles and Applications» IEEE, vol. 3, pg. 1089-1100, 2015.

ANEXOS

ANEXO 1: SCRIPT DE LA DECLARACIÓN DE DATOS DE LA RED

```

using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;

public class Datos : MonoBehaviour{

    public static float hbs = 10.5f;
    public static float dhb = 1.5f;
    public static float hm = 1.3f;
    public static float dHm = 4.7f;

    public static float d2d, d3d, d3dInd, d3d1, d3d2, angle1, angle2;

    public static float LOS_ITU_28, NLOS_ITU_28;
    public static float LOS_3GPP_28, NLOS_3GPP_28;
    public static float LOS_METIS_28, NLOS_METIS_28;

    public static float LOS_ITU_73, NLOS_ITU_73;
    public static float LOS_3GPP_73, NLOS_3GPP_73;
    public static float LOS_METIS_73, NLOS_METIS_73;

    void Update()
    {
        angle1 = Mathf.Cos(DegreeToRadian(angle1));
        angle2 = Mathf.Cos(DegreeToRadian(angle2));
        d2d = d3d * angle1;
    }

    float DegreeToRadian(float Degree)
    {
        return Mathf.PI / 180 * Degree;
    }

    float RadianToDegree(float Radian)
    {
        return 180 * Radian / Mathf.PI;
    }
}

```

ANEXO 2: SCRIPT DE LA INTERFAZ GRÁFICA

```

using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
using UnityEngine.UI;

public class DatosEnPantalla : MonoBehaviour {

    [Header("Distancias")]
    public Text distanciaIndir;
    public Text anguloDir;
    public Text anguloIndir;
    public Text d3d;
    public Text d2d;
    public Text d3d1;
    public Text d3d2;

    [Header("Datos ITU")]
    public Text LOS_ITU_28;
    public Text NLOS_ITU_28;
    public Text LOS_ITU_73;
    public Text NLOS_ITU_73;
    public Text LineaTxt;

    [Header("Datos 3GPP")]
    public Text LOS_3GPP_28;
    public Text NLOS_3GPP_28;
    public Text LOS_3GPP_73;
    public Text NLOS_3GPP_73;

    [Header("Datos METIS")]
    public Text LOS_METIS_28;
    public Text NLOS_METIS_28;
    public Text LOS_METIS_73;
    public Text NLOS_METIS_73;

    // Use this for initialization
    void Start () {

    }

    // Update is called once per frame
    void Update () {

        #region Distancias
        distanciaIndir.text = Datos.d3dInd.ToString("N2") + "m";
        anguloDir.text = Datos.angle1.ToString("N2") + "°";
        anguloIndir.text = Datos.angle2.ToString("N2") + "°";

        d3d.text = Datos.d3d.ToString("N2") + "m";
        d2d.text = Datos.d2d.ToString("N2") + "m";

```

```

d3d1.text = Datos.d3d1.ToString("N2") + "m";
d3d2.text = Datos.d3d2.ToString("N2") + "m";
#endregion

#region ITU
LOS_ITU_28.text = Datos.LOS_ITU_28.ToString("N2");
NLOS_ITU_28.text = Datos.NLOS_ITU_28.ToString("N2");

LOS_ITU_73.text = Datos.LOS_ITU_73.ToString("N2");
NLOS_ITU_73.text = Datos.NLOS_ITU_73.ToString("N2");
#endregion

#region 3GPP
LOS_3GPP_28.text = Datos.LOS_3GPP_28.ToString("N2");
NLOS_3GPP_28.text = Datos.NLOS_3GPP_28.ToString("N2");

LOS_3GPP_73.text = Datos.LOS_3GPP_73.ToString("N2");
NLOS_3GPP_73.text = Datos.NLOS_3GPP_73.ToString("N2");
#endregion

#region METIS
LOS_METIS_28.text = Datos.LOS_METIS_28.ToString("N2");
NLOS_METIS_28.text = Datos.NLOS_METIS_28.ToString("N2");

LOS_METIS_73.text = Datos.LOS_METIS_73.ToString("N2");
NLOS_METIS_73.text = Datos.NLOS_METIS_73.ToString("N2");
#endregion
}
}

```

ANEXO 3: SCRIPT DEL GENERADOR DE RAYOS

```

using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;

public class GeneradorDeRayos : MonoBehaviour {

    #region Variables

    [Header("Objetos Para la interaccion del rayo")]
    //Objetivo (Persona a la que sigue el rayo)
    public Transform target;

    //Vertices del edificio donde se mueve el rayo
    public Transform verticeVariable, verticeFijo;

    //Variables para medir las distancias de los rayos
    public static float distanciaDirecta;
    public static float disInd1, disInd2;
    public static float distanciaIndirecta;
    public static float anguloDirecto, anguloIndirecto;

    //Direcciones de los vertices, se usan para direccionar el rayo
    private Vector3 dirVerticeVariable, dirVerticeFijo;

    //Direccion del vector del rayo directo e indirecto hacia el usuario objetivo
    private Vector3 dirTargetDirecto, dirTargetIndirecto;

    // Rayos directos y hit1 y hit2 indirectos
    private RaycastHit hit1, hit2;
    private RaycastHit hitDirect;

    //Variable de control para saber cuando esta en un vertice fijo y cuando no.
    bool ativarVerticeFijo = true;
    #endregion

    #region Buliltin Methods
    // Use this for initialization
    void Start()
    {
        distanciaDirecta = 0.0f;
        distanciaIndirecta = 0.0f;
        disInd2 = 0.0f;
        disInd1 = 0.0f;
    }

    // Update is called once per frame
    void Update()
    {
        HandleRayDirect();
        HandleRayIndirect();
    }
    #endregion
}

```

```

#region Custom Methods

void HandleRayDirect()
{
    //Direccion del Rayo directo
    dirTargetDirecto = target.position - transform.position;

    //Genera rayo directo hacia el usuario
    if (Physics.Raycast(transform.position, dirTargetDirecto, out hitDirect,
Mathf.Infinity))
    {
        //Primer rayo Directo solo se renderiza si no golpea con un obstaculo
        if (!hitDirect.transform.gameObject.CompareTag("Obstaculo"))
        {
            //Datos.d3d = hitDirect.distance;
            Datos.d3d = dirTargetDirecto.magnitude;
            Datos.angle1 = 180 * Mathf.Atan(Mathf.Abs(dirTargetDirecto.y) /
Mathf.Abs(dirTargetDirecto.x)) / Mathf.PI;
            Debug.DrawRay(transform.position, dirTargetDirecto, Color.yellow);
        }
        else
        {
            Datos.d3d = hitDirect.distance;
        }
    }
}

void HandleRayIndirect()
{
    //Direccion del primer tramo del rayo indirecto hacia el vertice variable
    //que se va actualizando dependiendo de la posicion del usuario
    dirVerticeVariable = new Vector3(verticeVariable.position.x,
verticeVariable.position.y, target.position.z) - transform.position;

    //Genera primer tramo del rayo indirecto hacia el el vertice variable o fijo
    if (Physics.Raycast(transform.position, dirVerticeVariable, out hit1,
Mathf.Infinity))
    {
        //Genera la direccion del tramo 2 del rayo hacia el usuario
        dirTargetIndirecto = target.position - hit1.point;

        // Si el rayo golpea con el vertice fijo se activa el control para que
        //quede con el vertice fijo
        if (hit1.transform.gameObject.CompareTag("VerticeFijo"))
        {
            //Debug.Log("Estoy en vertice fijo");
            ativarVerticeFijo = true;
            verticeFijo = hit1.transform.gameObject.transform;
        }

        //Genera el segundo tramo del rayo indirecto hacia el usuario
        Physics.Raycast(hit1.transform.position, dirTargetIndirecto, out hit2,
Mathf.Infinity);
    }
}

```

```

        //Compara si el rayo esta golpeando con el vertice variable y prosigue
con esa logica
        if (hit1.transform.gameObject.CompareTag("VerticeVariable"))
        {
            //Debug.Log("Estoy en vertice variable");
            //Si esta en el vertice varibale es porque no esta el en fijo,
entonces desactivamos esa variable
            ativarVerticeFijo = false;

            //Dibuja el tramo 1 del rayo indirecto apuntando al vertice varibale
            Debug.DrawRay(transform.position, dirVerticeVariable, Color.yellow);

            //Dibuja el tramo 2 del rayo hacia el usuario siempre que este no
toque a un obstaculo
            if (!hit2.transform.gameObject.CompareTag("Obstaculo"))
            {
                Datos.d3d1 = disInd1 = dirVerticeVariable.magnitude;
                Datos.d3d2 = disInd2 = dirTargetIndirecto.magnitude;
                Datos.angle2 = 180 * Mathf.Asin(Mathf.Abs(dirTargetIndirecto.y)
/ disInd2) / Mathf.PI;
                Debug.DrawRay(hit1.point, dirTargetIndirecto, Color.red);
            }
            else
            {
                distanciaIndirecta = 0;
            }
        }

        Physics.Raycast(hit1.transform.position, dirTargetIndirecto, out hit2,
Mathf.Infinity);

        //Compara si el rayo esta golpeando con el vertice fijo y prosigue con
esa logica
        if (ativarVerticeFijo)
        {
            //Direccion hacia el vertice fijo
            dirVerticeFijo = verticeFijo.position - transform.position;

            //Dibuja el tramo 1 del rayo indirecto apuntando al vertice fijo
            Debug.DrawRay(transform.position, dirVerticeFijo, Color.yellow);

            //Dibuja el rayo del tramo 2
            dirTargetIndirecto = target.position - verticeFijo.position;

            //Se genera nuevamente el rayo desde el punto fijo hacia el usuario,
porque el otro rayo ya no esta tocando el punto del usuario
            Physics.Raycast(verticeFijo.position, dirTargetIndirecto, out hit2,
Mathf.Infinity);

            //Dibuja el tramo 2 del rayo hacia el usuario siempre que este no
toque a un obstaculo
            if (!hit2.transform.gameObject.CompareTag("Obstaculo"))
            {
                Datos.d3d2 = dirTargetIndirecto.magnitude;
                Datos.angle2 = 180 * Mathf.Asin(Mathf.Abs(dirTargetIndirecto.y)
/ Datos.d3d2) / Mathf.PI;

```

```
Color.red);          Debug.DrawRay(verticeFijo.position, dirTargetIndirecto,
                      }
                      else
                      {
                          distanciaIndirecta = 0;
                      }
                  }

                  Datos.d3dInd = Datos.d3d1 + Datos.d3d2;
              }
          }
      #endregion
  }
```

ANEXO 4: SCRIPT DEL MECANISMO CONTROLADOR DEL MÓVIL

```
using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;

public class MecanimController : MonoBehaviour {

    public Animator animController;

    // Use this for initialization
    void Start () {

        animController = GetComponent<Animator>();

    }

    // Update is called once per frame
    void Update () {

        if(Input.anyKey)
        {
            animController.SetBool("walk", true);
        }
        else
        {
            animController.SetBool("walk", false);
        }
    }

}
```


ANEXO 5: SCRIPT DEL CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN PARA EL MODELO IMT

```

using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
using UnityEngine.UI;
public class ModeloITU : MonoBehaviour{

    #region Variables
    public Text lineaTxt;

    private float hE = 1.0f;
    private float hBS = 10.5f;
    private float h_BS = 9.50f;
    private float h_UT = 0.5f;

    private float PLlosITU28ghz;
    private float PNLlosITU28ghz;

    private float PLlosITU73ghz;
    private float PNLlosITU73ghz;

    private float PL_UMA_LOS_28;
    private float PL_UMA_LOS_73;
    private float PL;

    float a, b;

    private float d2d, d3d;
    private float hm;
    private float Plos, dBP_28, dBP_73;

    float PL_28, PL_73;
    #endregion

    // Use this for initialization
    void Start()    {

    }

    // Update is called once per frame
    void Update()    {

        Handle_ModeloITU();
        if (Input.GetKeyDown("space"))
        {

        }

    }

    void Handle_ModeloITU()

```

```

{
    d3d = Datos.d3d;
    d2d = Datos.d2d;

    a = Random.value;
    b = Random.value;

    Debug.Log("a= " + a);
    Debug.Log("b= " + b);

    //73 GHz
    //dBP_73 = 1773.33f;
    dBP_73 = 2774f;

    //28 GHz
    //dBP_28 = 4623.33f;
    dBP_28 = 1064;

    if (d2d <= 18)
    {
        Plos = 1.0f;
    }
    else
    {
        Plos = (18 / d2d + Mathf.Exp(-d2d / 63) * (1 - (18 / d2d)));
    }

    Debug.Log("Plos= " + Plos);

    if (Plos > a)
    {
        lineaTxt.text = ("Tiene linea de vista");
        float PL1_28 = 28.0f + 22 * Mathf.Log10(d3d) + 20 * Mathf.Log10(28);
        float PL1_73 = 28.0f + 22 * Mathf.Log10(d3d) + 20 * Mathf.Log10(73);

        float PL2_28 = 28.0f + 40 * Mathf.Log10(d3d) + 20 * Mathf.Log10(28) -
        9 * Mathf.Log10(Mathf.Pow((dBP_28), 2) + Mathf.Pow((hBS - h_UT), 2));

        float PL2_73 = 28.0f + 40 * Mathf.Log10(d3d) + 20 * Mathf.Log10(73) -
        9 * Mathf.Log10(Mathf.Pow((dBP_73), 2) + Mathf.Pow((hBS - h_UT), 2));

        if (10 < d2d && d2d < dBP_28)
        {
            PL_UMA_LOS_28 = PL1_28;
        }
        else if (dBP_28 < d2d && d2d < 5000)
        {
            PL_UMA_LOS_28 = PL2_28;
        }

        if (10 < d2d && d2d < dBP_73)
        {
            PL_UMA_LOS_73 = PL1_73;
        }
        else if (dBP_73 < d2d && d2d < 5000)
        {

```

```

        PL_UMA_LOS_73 = PL2_73;
    }
}
else
{
    lineaTxt.text = ("No tiene linea de vista");
    PL_28 = 32.4f + 20 * Mathf.Log10(28) + 30 * Mathf.Log10(d3d);
    PL_73 = 32.4f + 20 * Mathf.Log10(73) + 30 * Mathf.Log10(d3d);
}
;
PLlosITU28ghz = PL_UMA_LOS_28 + 4 * b;
PNLlosITU28ghz = PL_28 + (7.8f * b);

PLlosITU73ghz = PL_UMA_LOS_73 + 4f * b;
PNLlosITU73ghz = PL_73 + (7.8f * b);

Datos.LOS_ITU_28 = PLlosITU28ghz;
Datos.NLOS_ITU_28 = PNLlosITU28ghz;

Datos.LOS_ITU_73 = PLlosITU73ghz;
Datos.NLOS_ITU_73 = PNLlosITU73ghz;

//Debug.Log("ITU");
//Debug.Log("LoS 28 " + PL_UMA_LOS_28);
//Debug.Log("LoS 73 " + PL_UMA_LOS_73);
//Debug.Log("NLoS 28 " + PNLlosITU28ghz);
//Debug.Log("NLoS 73 " + PNLlosITU73ghz);
}
}

```

ANEXO 6: SCRIPT DEL CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN PARA EL MODELO 3GPP

```

using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
using UnityEngine.UI;

public class Modelo3GPP : MonoBehaviour{

    #region Variables
    public Text lineaTxt;

    private float hE = 1.0f;
    private float hBS = 10.5f;
    private float h_BS = 9.50f;
    private float h_UT = 0.5f;

    private float PLlos3GPP28ghz;
    private float PNLlos3GPP28ghz;

    private float PLlos3GPP73ghz;
    private float PNLlos3GPP73ghz;

    private float PL_UMA_LOS_28;
    private float PL_UMA_LOS_73;
    private float PL;

    float a, b;

    private float d2d, d3d;
    private float hm;
    private float Plos, dBP_28, dBP_73;

    float PL_28, PL_73;
    #endregion

    // Use this for initialization
    void Start()
    {

    }

    // Update is called once per frame
    void Update()
    {

        Handle_Modelo3GPP();
        if (Input.GetKeyDown("space"))
        {

        }

    }
}

```

```

void Handle_Modelo3GPP()
{
    d3d = Datos.d3d;
    d2d = Datos.d2d;

    a = Random.value;
    b = Random.value;

    Debug.Log("a= " + a);
    Debug.Log("b= " + b);

    //73 GHz
    //dBP_73 = 1773.33f;
    dBP_73 = 2774f;

    //28 GHz
    //dBP_28 = 4623.33f;
    dBP_28 = 1064;

    if (d2d <= 18)
    {
        Plos = 1.0f;
    }
    else
    {
        Plos = (18 / d2d + Mathf.Exp(-d2d / 63) * (1 - (18 / d2d)));
    }

    Debug.Log("Plos= " + Plos);

    if (Plos > a)
    {
        lineaTxt.text = ("Tiene linea de vista");
        float PL1_28 = 32.4f + 20 * Mathf.Log10(d3d) + 20 * Mathf.Log10(28);
        float PL1_73 = 32.4f + 20 * Mathf.Log10(d3d) + 20 * Mathf.Log10(73);

        float PL2_28 = 32.4f + 40 * Mathf.Log10(d3d) + 20 * Mathf.Log10(28) -
10 * Mathf.Log10(Mathf.Pow((dBP_28), 2) + Mathf.Pow((hBS - h_UT), 2));

        float PL2_73 = 32.4f + 40 * Mathf.Log10(d3d) + 20 * Mathf.Log10(73) -
10 * Mathf.Log10(Mathf.Pow((dBP_73), 2) + Mathf.Pow((hBS - h_UT), 2));

        if (10 < d2d && d2d < dBP_28)
        {
            PL_UMA_LOS_28 = PL1_28;
        }
        else if (dBP_28 < d2d && d2d < 5000)
        {
            PL_UMA_LOS_28 = PL2_28;
        }

        if (10 < d2d && d2d < dBP_73)
        {
            PL_UMA_LOS_73 = PL1_73;
        }
        else if (dBP_73 < d2d && d2d < 5000)

```

```

        {
            PL_UMA_LOS_73 = PL2_73;
        }
    }
    else
    {
        lineaTxt.text = ("No tiene linea de vista");
        PL_28 = 32.4f + 20 * Mathf.Log10(28) + 30 * Mathf.Log10(d3d);
        PL_73 = 32.4f + 20 * Mathf.Log10(73) + 30 * Mathf.Log10(d3d);
    }
;
    PLlos3GPP28ghz = PL_UMA_LOS_28 + 4 * b;
    PNLlos3GPP28ghz = PL_28 + (7.8f * b);

    PLlos3GPP73ghz = PL_UMA_LOS_73 + 4f * b;
    PNLlos3GPP73ghz = PL_73 + (7.8f * b);

    Datos.LOS_3GPP_28 = PLlos3GPP28ghz;
    Datos.NLOS_3GPP_28 = PNLlos3GPP28ghz;

    Datos.LOS_3GPP_73 = PLlos3GPP73ghz;
    Datos.NLOS_3GPP_73 = PNLlos3GPP73ghz;

    //Debug.Log("3GPP");
    //Debug.Log("LoS 28 " + PL_UMA_LOS_28);
    //Debug.Log("LoS 73 " + PLlos3GPP73ghz);
    //Debug.Log("NLoS 28 " + PNLlos3GPP28ghz);
    //Debug.Log("NLoS 73 " + PNLlos3GPP73ghz);
}
}

```

ANEXO 7: SCRIPT DEL CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN PARA EL MODELO METIS

```

using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;

public class ModeloMETIS : MonoBehaviour{

    private float b = 15f;
    private float R; // este es d2d
    private float l = 8f;
    private float hr = 9; //altura del edificio
    private float kf_28, kf_73;
    private float ka, kd, kb;
    private float angle;

    private float Lsf_28, Lrts_28, Lmsd_28;
    private float Lsf_73, Lrts_73, Lmsd_73;
    private float Lbsh;
    private float LR_28, LR_73;

    private float QM_28, QM_73;

    private float PLlosMETIS28ghz;
    private float PLNlosMETIS28ghz;

    private float PLlosMETIS73ghz;
    private float PLNlosMETIS73ghz;

    private float d2d, d3d;
    private float hm;
    private float Plos, dBP_28, dBP_73;

    private float lambda_28 = 0.01f;
    private float lambda_73 = 0.004f;

    private float ds_28;
    private float ds_73;

    // Use this for initialization
    void Start(){
        kf_28 = 0.7f * ((28000 / 925) - 1);
        kf_73 = 0.25f * ((73000 / 925) - 1);
    }

    // Update is called once per frame
    void Update(){
        Handle_METIS();
    }

    void Handle_METIS()
    {
        R = Datos.d2d;
    }
}

```

```

angle = Datos.angle2 * Mathf.Deg2Rad;

Lsf_28 = -10 * Mathf.Pow(Mathf.Log10(lambda_28 / (4 * Mathf.PI * R)), 2);
Lsf_73 = -10 * Mathf.Pow(Mathf.Log10(lambda_73 / (4 * Mathf.PI * R)), 2);

Lrts_28 = -20 * Mathf.Log10(0.5f - Mathf.Atan(Mathf.Sign(angle) *
Mathf.Sqrt(Mathf.Pow(Mathf.PI, 3) / (4 * lambda_28) * Datos.d3d2 * (1 -
Mathf.Cos(angle)))) / Mathf.PI);
Lrts_73 = -20 * Mathf.Log10(0.5f - Mathf.Atan(Mathf.Sign(angle) *
Mathf.Sqrt(Mathf.Pow(Mathf.PI, 3) / (4 * lambda_73) * Datos.d3d2 * (1 -
Mathf.Cos(angle)))) / Mathf.PI);

ds_28 = (lambda_28 * Mathf.Pow(d2d, 2)) / Mathf.Pow(Datos.dhb, 2);
ds_73 = (lambda_73 * Mathf.Pow(d2d, 2)) / Mathf.Pow(Datos.dhb, 2);

if (Datos.hbs > hr)
{
    ka = 54.0f;
    kd = 18;
    Lbsh = -18 * Mathf.Log10(1 + Datos.dhb);
}
else if (Datos.hbs <= hr && R > 500)
{
    ka = 54 - 0.8f * Datos.dhb;
}
else if (Datos.hbs <= hr && R < 500)
{
    ka = 54 - 1.6f * Datos.dhb * R / 1000;
}

if (Datos.hbs <= hr)
{
    kd = 18 - 15 * (Datos.dhb / hr);
    Lbsh = 0;
}

if (Datos.hbs < hr)
{
    QM_28 = 2.35f * Mathf.Pow(((Datos.dhb / R) * Mathf.Sqrt(b / lambda_28)),
0.9f);
    QM_73 = 2.35f * Mathf.Pow(((Datos.dhb / R) * Mathf.Sqrt(b / lambda_73)),
0.9f);
}
else if (Datos.hbs > hr)
{
    QM_28 = b / R;
    QM_73 = b / R;
}
else
{
    float theta = Mathf.Atan(Datos.dhb / b);
    float ro = Mathf.Sqrt(Mathf.Pow(Datos.dhb, 2) + Mathf.Pow(b, 2));
    QM_28 = (b / (2 * Mathf.PI * R) * Mathf.Sqrt(lambda_28 / ro) * (1 /
theta - 1 / (2 * Mathf.PI + theta)));
    QM_73 = (b / (2 * Mathf.PI * R) * Mathf.Sqrt(lambda_73 / ro) * (1 /
theta - 1 / (2 * Mathf.PI + theta)));
}

```



```

    }

    //Condicion principal

    if (1 > ds_28)
    {
        Lmsd_28 = Lbsh + ka + kb + kd * Mathf.Log10(R / 1000) + kf_28 *
Mathf.Log10(28000) - 9 * Mathf.Log10(b);
    }
    else
    {
        Lmsd_28 = -10 * Mathf.Log10(Mathf.Pow(QM_28, 2));
    }

    if (1 > ds_73)
    {
        Lmsd_73 = Lbsh + ka + kb + kd * Mathf.Log10(R / 1000) + kf_73 *
Mathf.Log10(73000) - 9 * Mathf.Log10(b);
    }
    else
    {
        Lmsd_73 = -10 * Mathf.Log10(Mathf.Pow(QM_73, 2));
    }

    //Encontrar LR_28
    if (Lrts_28 + Lmsd_28 > 0)
    {
        LR_28 = Lsf_28 + Lrts_28 + Lmsd_28;
    }
    else
    {
        LR_28 = Lsf_28;
    }

    //Encontrar LR_73
    if (Lrts_73 + Lmsd_73 > 0)
    {
        LR_73 = Lsf_73 + Lrts_73 + Lmsd_73;
    }
    else
    {
        LR_73 = Lsf_73;
    }

    PLlosMETIS28ghz = LR_28;
    PLNlosMETIS28ghz = LR_28;

    PLlosMETIS73ghz = LR_73;
    PLNlosMETIS73ghz = LR_73;

    Datos.LOS_METIS_28 = 0 - PLlosMETIS28ghz;
    Datos.NLOS_METIS_28 = 0 - PLNlosMETIS28ghz;

    Datos.LOS_METIS_73 = 0 - PLlosMETIS73ghz;
    Datos.NLOS_METIS_73 = 0 - PLNlosMETIS73ghz;
}
}

```